

Модуль «AQUA»

**Расчет материалов и поперечных сечений элементов
SOFISTIK 2018**

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	7
1.1 Постановка задачи.....	7
1.2 Типы поперечных сечений.....	7
1.2.1 Статические свойства поперечных сечений.....	7
1.2.2 Стандартные поперечные сечения (металлические профили, тавровые бетонные балки и т.п.).....	8
1.2.3 Пользовательские тонкостенные поперечные сечения.....	8
1.2.4 Пользовательские сплошные поперечные сечения.....	9
1.2.5 Пользовательские сечения, заданные при помощи конечных элементов.....	9
1.2.6 Выбор типа поперечного сечения.....	10
1.3 Создание вариантов сечений.....	11
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ.....	13
2.1 Материалы.....	13
2.2 Отверстия и композитные/составные сечения.....	14
2.3 Система координат.....	15
2.4 Нормальные напряжения.....	18
2.5 Расчетная/эффективная ширина.....	19
2.6 Напряжения при деформации и сдвиге.....	20
2.7 Момент инерции относительно оси кручения.....	22
2.8 Напряжения сдвига в сплошных монолитных сечениях.....	23
2.8.1 Метод конечных элементов – <i>FEM</i>	25
2.8.2 Метод граничных элементов.....	37
2.8.3 Метод сил.....	39
2.8.4 Эквивалентное поперечное сечение.....	44
2.8.5 Плоскость сдвига/среза.....	44
2.9 Напряжения сдвига в тонкостенных сечениях.....	46
2.10 Пластические усилия.....	47
2.11 Программные ограничения.....	49
3 ОПИСАНИЕ ВВОДНЫХ КОМАНД.....	51
3.1 Используемый язык программирования.....	52
3.2 Используемые единицы измерения.....	52
3.3 Ввод данных в расчетную систему.....	54
3.4 <i>CTRL</i> – Управление процессом анализа системы в <i>AQUA</i>	60
3.5 Материалы.....	69
3.6 <i>NORM</i> – Нормы проектирования и расчета сооружений.....	72

3.7 <i>MATE</i> – Свойства материала	94
3.8 <i>MAT</i> - Общие свойства материала	104
3.9 <i>MLAY</i> – Слоистый материал	106
3.10 <i>NMAT</i> – Нелинейный материал	108
3.10.1 Инварианты/постоянные величины тензора напряжений	109
3.10.2 Параметры материала	112
3.10.3 Нелинейные переменные состояния (параметры упрочнения).....	120
3.10.4 <i>VMIS</i> – Свойства вязкопластичного материала (модель Фон Мизеса).....	122
3.10.5 <i>DRUC</i> – Свойства вязкопластичного материала (модель Друкера-Прагера)	124
3.10.6 <i>MOHR</i> – Свойства вязкопластичного материала (модель Кулона-Мора).....	128
3.10.7 <i>GRAN</i> – Модель с независимым упрочнением формоизменения и уплотнения грунта	130
3.10.8 <i>SWEL</i> – Набухание грунтов.....	144
3.10.9 <i>FAUL</i> – Ориентированные плоскости сдвига.....	148
3.10.10 <i>ROCK</i> – Материал с ориентированной плоскостью сдвига.....	151
3.10.11 <i>UNDR</i> – Обводненные грунты	153
3.10.12 <i>LADE</i> – Свойства упругопластического материала.....	163
3.10.13 <i>MEMB</i> – Свойства мембранных/текстильных материалов	167
3.10.14 Пользовательские модели поведения материалов.....	169
3.11 <i>BMAT</i> – Упругое основание/граница раздела двух материалов.....	173
3.12 <i>HMAT</i> – Константы/постоянные материала (модуль <i>HYDRA</i>).....	178
3.12.1 Гидравлические характеристики	180
3.12.2 Теплопроводность/теплопередача.....	182
3.12.3 Гидратация бетона	184
3.13 <i>CONC</i> – Свойства бетона	187
3.13.1 Бетон в Еврокоде/ <i>DIN 1045-1/OEN B 4700</i>	188
3.13.2 Бетон в <i>DIN 1045</i> (старый)/ <i>DIN 4227/DIN 18806</i>	194
3.13.3 Бетон в <i>ÖNORM B 4700 / B 4750</i>	196
3.13.4 Бетон в швейцарских нормах <i>SIA</i>	197
3.13.5 Бетон в <i>French BAEL-99</i>	198
3.13.6 Бетон в <i>Spanish EHE</i>	199
3.13.7 Бетона в <i>Swedish BBK</i>	199
3.13.8 Бетона в <i>Danish DS 411</i>	200
3.19.3 Бетон в <i>Norwegian NS 3473</i>	200
3.13.10 Бетон в итальянских нормах проектирования	200
3.13.11 Бетон в британских нормах проектирования <i>BS 8110</i>	201
3.13.12 Бетон в <i>ACI 318M</i> (Американский институт бетона/ <i>American Concrete Institute</i>)...	202

3.13.13 Бетон в бразильских нормах <i>NBR 6118-2003</i>	203
3.13.14 Бетон в австралийских <i>AS 3600</i> и новозеландских <i>NZS 3101</i> нормах	204
3.13.15 Бетон в китайских нормах.....	204
3.13.16 Бетон в индийских нормах <i>IS/IRC</i>	205
3.13.17 Бетон в российских нормах СНиП	205
3.13.18 Линейно упругий бетон.....	206
3.14 <i>STEE</i> – Свойства металла.....	208
3.14.1 Конструкционная сталь	209
3.14.2 Алюминиевый сплав.....	225
3.14.3 Обычная и преднапряженная арматура	229
3.14.4 Процесс релаксации.....	240
3.14.5 Сцепление арматуры с бетоном	242
3.14.16 Зависимость напряжений и деформаций.....	243
3.15 <i>TIMB</i> – Древесные и волокнистые материалы.....	246
3.16 <i>MASO</i> – Каменная/кирпичная кладка	255
3.17 <i>SSLA</i> – Кривые зависимостей напряжений и деформаций	258
3.18 <i>MEXT</i> – Дополнительные постоянные воздействия.....	266
3.18.1 <i>AIR</i> – Взаимодействие с атмосферой	267
3.18.2 <i>CNOM</i> – Защитный слой бетона.....	267
3.18.3 <i>CRW</i> – Ширина раскрытия трещины	267
3.18.4 <i>EIGE</i> – Коэффициенты ползучести	268
3.18.5 <i>EIGC, EIGS</i> – Пользовательские графики функций ползучести и усадки	269
3.18.6 <i>KR</i> – Эквивалентная шероховатость	270
3.18.7 <i>TEMP</i> – Температурное воздействие	272
3.19 <i>BORE</i> – Сечение грунтового массива или скважины.....	273
3.20 <i>BLAY</i> – Слои грунтового основания	275
3.21 <i>BBAX</i> – Свойства грунтового основания вдоль оси сваи – соосное напластование	279
3.22 <i>BBLA</i> – Поперечные коэффициенты постели для сваи (горизонтальная слоистость).....	282
3.23 <i>BTAB</i> - Давление на грунт у подошвы фундамента	286
3.24 <i>SMAT</i> – Свойства пружин и шарнирных соединений в балке.....	288
3.24.1 Примеры материала и их характеристики.....	294
3.25 <i>SFLA</i> – Зависимость усилий и перемещений/деформаций.....	303
3.26 <i>SVAL</i> – Характеристики поперечного сечения	310
3.27 <i>SREC</i> – Прямоугольное сечение, тавровая балка, плита	314
3.28 <i>SCIT</i> – Круглые и кольцевидные (трубы) сечения	322
3.29 <i>TUBE</i> - Круглые и кольцевидные сечения из металла.....	325

3.30	<i>CABL</i> – Сечение кабеля/троса	326
3.31	<i>SECT</i> – Пользовательские поперечные сечения	332
3.31.1	Параметрические сечения	338
3.31.2	Конечно-элементные сечения	343
3.32	<i>CS</i> – Этапы возведения элемента конструкции	345
3.33	<i>SV</i> – Дополнительные свойства поперечного сечения.....	349
3.34	<i>POLY</i> – Многоугольный элемент поперечного сечения/отверстие в элементе конструкции	354
3.35	<i>VERT</i> – Вершины многоугольника в абсолютных координатах.....	357
3.36	<i>CIRC</i> – Элементы круглого сечения	360
3.37	<i>CUT</i> – Плоскость сдвига и участки расчетного сечения	362
3.38	<i>PANE</i> – Элементы тонкостенного поперечного сечения.....	373
3.38	<i>PLAT</i> – Элементы тонкостенного поперечного сечения	377
3.40	<i>WELD</i> – Сварное соединение, работающее на сдвиг	381
3.41	<i>PROF</i> – Прокатные металлические элементы	383
3.42	<i>SPT</i> – Геометрия сечения и концентраторы напряжений.....	399
3.43	<i>NEFF</i> – Неэффективные (незадействованные) области сечения.....	402
3.44	<i>WPAR</i> – Параметры ветрового воздействия/ветровой нагрузки.....	407
3.45	<i>WIND</i> – Коэффициенты для ветровой и волной нагрузки.....	410
3.46	<i>LAY</i> – Слоя армирования.....	415
3.46.1	Свойства элементов армирования.....	416
3.46.2	Правила задания слоев армирования	419
3.47	<i>RF</i> – Одиночное армирование	423
3.48	<i>LRF</i> – Линейное армирование	425
3.49	<i>CRF</i> - Армирование по окружности	428
3.50	<i>CURF</i> – Армирование по периметру	430
3.51	<i>TVAR</i> – Переменные шаблона	434
3.52	<i>INTE</i> – Интерполирование или варианты сечений элемента	436
3.53	<i>IMPO</i> – Импорт данных	439
3.54	<i>EXPO</i> – Экспорт данных <i>Ansi</i>	440
2.55	<i>ECHO</i> – Объем отображения результатов	441
4	ВЫВОД ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА/АНАЛИЗА	446
4.1	Информация об использованной нормативной документации.....	446
4.2	Свойства материала.....	446
4.3	Сечение грунтового основания	456
4.4	Обзор характеристик и типов поперечного сечения.....	458
4.5	Свойства поперечного сечения	459

4.6 Элементы поперечного сечения.....	465
4.7 Коэффициенты ветрового воздействия.....	472
4.8 Метод интегральных уравнений.....	473
4.9 Характеристики пружинных элементов и их зависимости.....	474
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	475

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Постановка задачи

Модуль *AQUA* позволяет рассчитать свойства поперечных сечений элементов любой формы и изготовленных из любого материала. Данный модуль способен рассчитать значения свойств поперечного сечения в процессе их статического анализа, а также характерные величины для расчета нормальных и сдвиговых напряжений, возникающих от действия расчетных нагрузок. Расчетные сечения, для корректной работы программы, должны быть введены до создания статической расчетной системы или ввода ее габаритных размеров – модуль *AQB*.

После ввода в систему поперечных сечений при помощи рассматриваемого модуля *AQUA*, они (сечения) могут быть отображены в графическом виде при помощи программного модуля *ResultViewer*.

В формате работы в данном программном комплексе, в зависимости от сложности решаемой задачи при проектировании сооружения, существует четыре типа поперечных сечений, описанных в п.п. 1.2 (стандартные поперечные сечения; пользовательские тонкостенные поперечные сечения; тонкостенные сплошные поперечные сечения; сечения, введенные при помощи конечных элементов). Без лицензии для модуля *AQUA* могут быть заданы только первые два типа (*AQUA-light*).

1.2 Типы поперечных сечений

1.2.1 Статические свойства поперечных сечений

Все статические свойства поперечных сечений рассчитываются автоматически. В эти свойства также включены области значений деформаций сдвига и значения сопротивления напряжению. Данные значения свойств могут быть взяты из других сечений с учетом коэффициента запаса/усиления. Данный тип сечений в большинстве случаев используется в статических расчетах. Область их применения в модуле *AQB* достаточно ограничена.

1.2.2 Стандартные поперечные сечения (металлические профили, тавровые бетонные балки и т.п.)

Все стандартные поперечные сечения (металлические профили, коробчатые, тавровые, трубчатые или кольцевые, ванты и т.д.) всегда вводятся в систему при помощи одной командой. В данном типе сечений учтены все свойства, включая крутящий момент инерции. Так как в данном типе сечений уже известны все геометрические особенности, то большинство значений свойств могут быть рассчитаны прямым способом, что позволяет опустить их подробный анализ на сопротивление сдвигу или пластичности – доступен только при наличии лицензии на модуль *AQUA*. В большинстве случаев предполагается, что данные значения свойств были взяты из таблиц, представленных в специализированной литературе. В редких случаях, учитывая изменчивость и расположение расчетных точек, расчет значений рассматриваемых свойств сечений ограничен. Более детальный анализ сечений или их комбинирование с другими поперечными сечениями возможны только при расчете стальных профилей.

1.2.3 Пользовательские тонкостенные поперечные сечения

Пользовательское тонкостенное поперечное сечение может содержать любое количество тонких элементов, толщина которых намного меньше длины всего расчетного элемента. Тонкий элемент – это элемент, в котором изменение значений нормального напряжения и большинства сдвиговых напряжений по всей толщине пренебрежимо мало. Данная особенность такого рода элемента приводит к тому, что момент инерции относительно оси с минимальными значениями данного момента – *weak axis*, также исчезает. К элементам, с подобным типом поперечного сечения, можно отнести панели, щиты, цементные швы, прокатные металлические изделия, сварные швы, а также арматуру.

Момент сопротивления поперечного сечения при всех возможных напряжениях доступен во всех точках расчетного поперечного сечения. Момент инерции относительно оси кручения и сопротивление деформации коробления, а

также центр сдвига и области сдвиговых деформаций определяются как для сечений открытого, так и замкнутого контура. В особых случаях рассматриваемые параметры могут быть указаны пользователем собственноручно. Также можно создать и композитные сечения.

1.2.4 Пользовательские сплошные поперечные сечения

Пользовательское сплошное поперечное сечение состоит из неограниченного количества внешних и внутренних границ, представленных в виде окружностей или многоугольников, а также арматурных элементов. Конструктивные стальные элементы могут быть введены в состав данного сечения.

Момент сопротивления данного типа сечения при воздействии всех напряжений доступен только в отдельных его точках. При работе с сечением могут быть рассчитаны значения крутящего момента инерции, центр сдвига и области сдвиговых деформаций, или же их можно ввести собственноручно. В данном случае расчет сопротивлению депланации будет недоступен. Используя данный тип сечения можно создавать композитные сечения или задавать расчетную ширину многогранников.

1.2.5 Пользовательские сечения, заданные при помощи конечных элементов

Пользовательское сечение, заданное при помощи конечных элементов *FE*, будет импортировано из конечно-элементной системы (сетки), информация по которой хранится в отдельной внешней базе данных. Позже можно добавить концентраторы напряжений, элементы армирования или плоскость сдвига. В процессе импорта сечения также можно активировать отображение поля распределения температур по его плоскости (например, при расчете температур).

При использовании данного типа сечений все его свойства и характеристики, включая значения деформаций депланации/кручения, анализируются программным комплексом. Значение момента сопротивления сечения элемента при действии на него всех усилий и моментов доступно во всех его (элемента) срединных точках. Также имеется возможность создания композитных сечений.

1.2.6 Выбор типа поперечного сечения

Пользователю необходимо самостоятельно принять решение о выборе того или иного типа поперечного сечения. Из-за установленных в программе ограничений стандартное поперечное сечение может иметь больше доступных значений характеристик в отличие от плохо сгенерированного пользователем (произвольного сечения) поперечного сечения.

Тонкостенные сечения имеют много общего со стандартными сечениями, используемыми в конструкции, в то время как для использования сечения сплошного типа требуются постоянные обоснования и дополнительные расчеты. Из данного утверждения можно сделать вывод, что применение тонкостенного типа сечения позволяет ускорить и упростить расчет, обеспечивает большую надежность и имеет более широкое применение при проектировании сооружения. Однако, при применении рассматриваемого типа сечения в процессе расчета программа пренебрегает локальными эффектами, которые возникают в расчетном элементе и которые могут стать более значимыми при решении интегральных уравнений или конечных элементов расчетной системы.

Например, следует отметить, что при расчете тонкостенных коробчатого типа сечений напряжение сдвига на самом деле не является постоянным по всей толщине стенки и может иметь более высокие значения в углах, в результате это потребует оптимизации геометрии сечения – сглаживание контура. С другой стороны, тонкостенные сечения имеют проблемы при учете положительного

эффекта от сглаживания или закругления металлических тонких элементов, который в значительной степени влияет на значение параметра прочности при кручении – предел прочности элемента при его кручении.

Проверка отношения c/t (отношение ширина/толщина поперечного сечения, используемое для предварительного определения габаритов) для стали намного легче выполняется для металлических тонкостенных сечений. Также необходимо знать, что моделирование соединения двух отдельных элементов возможно только при использовании такого типа поперечного сечения.

В большинстве случаев проблему следует ожидать, если поперечное сечение моделируется не при помощи оптимального метода. Особенно это касается очень тонких пластин/плит с элементами жесткости, которые были смоделированы как многоугольные элементы, для расчета которых необходимы очень большие расчетные затраты.

1.3 Создание вариантов сечений

В связи с тем, что большинство сечений строятся в соответствии с определенными правилами, исходя из этих правил, модуль *AQUA* предоставляет несколько вариантов создания поперечных сечений:

- Вы можете задать сечение при помощи команд на языке программирования *CADINP* в виде блока, который затем используется несколько раз.
- Вы можете использовать линейную интерполяцию между двумя разными сечениями.
- Вы можете задать шаблон поперечного сечения, состоящий из нескольких точек построения. Другие пункты будут ссылаться, исходя из иерархии, на исходные точки, которые были созданы вами ранее. Затем вы можете генерировать другие сечения, изменив свойства этих точек.

- Вы можете задать положение этих точек, задействовав при этом 3D рабочее окно, с искривленными линиями привязки или расчетными линиями.

Также модуль *AQUA* может обновлять все интерполированные или иным образом сгенерированные сечения при помощи одной команды *INTE*.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

2.1 Материалы

Значения характеристик свойств материалов следует различать в зависимости от того, должны ли они быть максимально приближены к реальным значениям (например, при динамических расчетах системы) или использованы с учетом коэффициента запаса для расчета предельной несущей способности элемента.

Небольшие, но сложно определяемые ошибки в программе объясняются тем, что многие обозначения, используемые в программном коде расчетной модели, используют коэффициент 10,0 для преобразования единицы плотности материала $[т/м^3]$ в вес, который измеряется в $[кН/м^3]$. В США в качестве основной единицы измерения используют фунт (*pound*) – одна из наиболее распространенных единиц массы и силы («фунт-сила», сокр. на англ. *lbm*).

Чтобы избежать путаницы при использовании всех преимуществ *SI-System* ПК *SOFiSTiK* необходимо придерживаться некоторых правил:

- Все введенные в систему веса должны быть указаны в $(кН/м^3)$ или (lb/ft^3) . Данные параметры сохраняются в базе данных в виде масс. Учитывая данную особенность, также возможно собственноручное введение значения параметра массы в $(кг/м^3)$ или (lbm/ft^3) .
- Значения масс при динамическом анализе или для плотностей при термическом анализе системы всегда определяются непосредственно исходя из этих данных (см. предыдущее правило выше).
- Если расчетный/программный код или сам пользователь допускают использование более точных значений нагрузок, то пользователь для обозначения точки отчета системы при помощи команды *NORM* может ввести истинное значение ускорения свободного падения.

Так как значения коэффициентов запаса ранее присваивались более или менее случайным образом, иногда для нагрузки, а иногда и для материала, более

свежие нормы и правила для проектирования (*Eurocode*) обеспечивают более четкое разделение этих коэффициентов как для нагрузок, так и для материалов.

Поскольку коэффициенты запаса для материалов по-прежнему зависят от характера нагрузки или типа рассчитываемой конструкции, модуль *AQUA* генерирует и сохраняет только оригинальные значения свойств материала. Однако, модуль *AQUA* учитывает только некоторые коэффициенты запаса, которые не зависят от конкретного случая нагружения, например, коэффициенты ослабления материала в долгосрочной перспективе.

Тем не менее, коэффициент запаса может быть введен в модуль *AQUA* для каждого материала по отдельности. Данная особенность модуля *AQUA* позволяет рассчитать значения пластических усилий и моментов, возникающих в сечении при действии на него нагрузок, а также позволяет проверить значения деформаций, рассчитанных в модуле *AQB*.

2.2 Отверстия и композитные/составные сечения

В случае, когда многоугольные и круговые отверстия перекрывают друг друга, программа генерирует получившееся отверстие в автоматическом режиме. Отверстие в системе задается при помощи материала с номером 0. Чтобы в процессе работы можно было избежать всевозможных неопределенностей, необходимо соблюдать некоторые правила:

- Многоугольные/круговые отверстия могут быть созданы и на других областях составного сечения, но только если они имеют другой номер материала и, по крайней мере, одну точку пересечения с другой областью. Последнее утверждение верно только при условии, когда края двух многоугольников перекрывают друг друга минимум на 0,5 мм.
- Если многоугольные/круговые отверстия полностью расположены в пределах другой области составного сечения, то отверстия будут

создаваться всегда, а если же области перекрыты частично, то последовательность создания отверстия имеет следующий вид: Область составного сечения, которая была введена в систему последней, будет считаться «впереди лежащей/*in front of*», а отверстие создастся в предыдущей области.

2.3 Система координат

Поперечные сечения, в соответствии с документом *DIN 1080*, ориентированы относительно локальной системы координат y - z балки. В данном случае ось x расположена вдоль балки. Наблюдателю представлена положительная граница сечения (в направлении от конца балки/стержня до начала).

Система координат сечения идентична локальной системе координат балки, т. е. локальная ось x проходит вдоль балки через узел пересечения осей y и z , расположенные перпендикулярно оси x . Ось z определяет основное направление системы и в целом ориентирована вниз в направлении силы тяжести.

Для описания значений усилий и моментов и условий опирания необходимо определить три точки, проходящие вдоль балки от начала до конца и, которые должны обладать отличными друг от друга свойствами внутри анализируемого сечения:

- **Центр тяжести (G)** – Физический смысл данного центра используется для расчета собственного веса и масс.
- **Упругий центр тяжести (S)** – Это центр тяжести, зависящий от значения модуля упругости сечения брутто (полного сечения с учетом пустот). Для однородного материала данный центр идентичен центру тяжести, поэтому его часто называют просто «центром». Данный параметр может учитывать минимальное армирование.

- **Центр жесткости (N)** – Это механическая точка, в которой действует нормальное (осевое) усилие. Напряжения, вызванные постоянной деформацией в общем сечении, не будут генерировать никаких изгибающих моментов в этой точке. Данная точка отличается от центра жесткости сечения с включенными в его состав отверстиями и фактическим армированием. Довольно часто данную точку называют центром сетки или идеальным (теоретическим) сечением.
- **Расчетный центр изгиба (B)** – Если в некоторых частях сечения не возникает соответствующих сдвиговых деформаций, то эти участки сечения, как правило, никак не подвержены изгибу. В данном случае это приводит к тому, что деформации и напряжения, возникающие при изгибе, связаны с расчетным центром изгиба. Поскольку изгибающий момент может свободно перемещаться по системе, то для данной операции никаких дополнительных усилий не вводятся.
- **Центр сдвига (M)** – Эта точка может быть введена в систему несколькими способами: сдвиговое усилие, действующее в этой точке, не создает кручения. Участок сечения, с приложенным к нему моментом кручения, будет вращаться вокруг этой точки. Таким образом, если необходимо ввести в систему явную ось вращения, эта точка должна быть также задана явно.
- **Ось балки** – Ось балки представляет собой прямую, соединяющую узлы балки. Сечение балки должно быть создано в определенном месте в системе, чтобы обеспечить правильный анализ всех эксцентриситетов. Точки сечения, расположенные на оси балки, являются наиболее предпочтительными для того, чтобы являться началом системы координат сечения (балка с координатной осью). В качестве альтернативного решения, вы можете использовать центр жесткости.

Примечание

- Шарниры всегда задаются в центре жесткости или центре сдвига.
- В принудительном порядке ось вращения должна совпадать с осью балки

Отклонения между этими точками будут создавать в системе изменения в значениях момента между опорой и концом балки. С другой стороны, при необходимости это позволит с легкостью описать полную геометрию с любыми возможными значениями эксцентриситетов и несимметричных балок и этапы возведения сооружения.

На рис. 2.1 изображены системы координат балки и сечения:

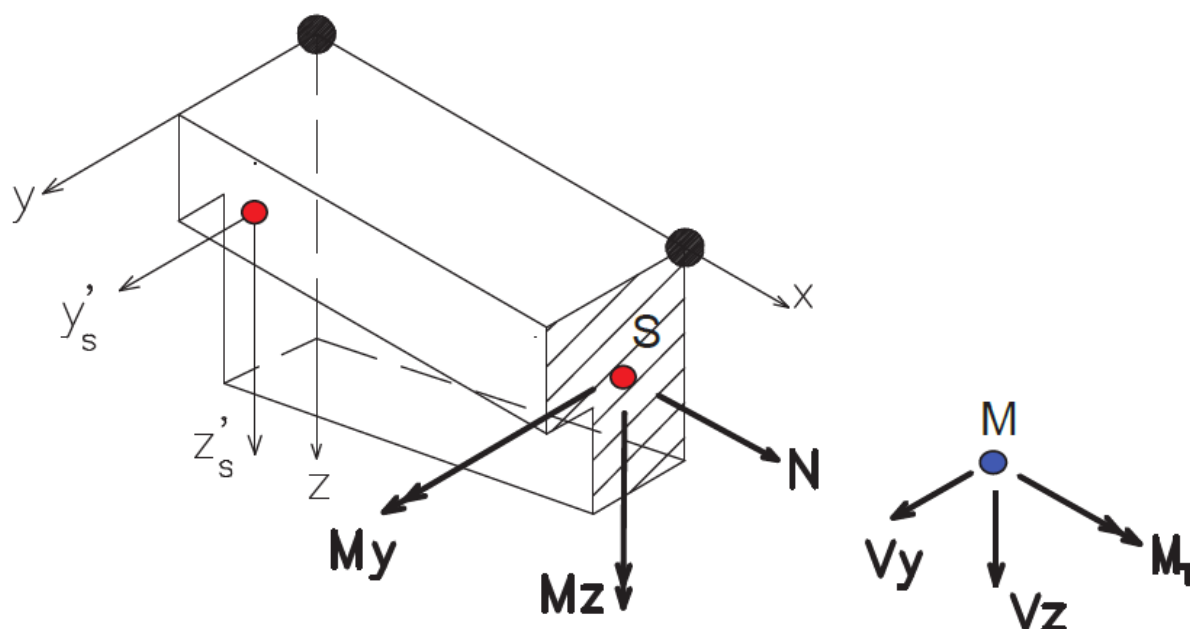


Рис. 2.1 – Система координат

x, y, z Локальная система координат балки, выбирается произвольно, задается относительно глобальной системы координат при проектировании балки.

y', z' система координат сечения при минимальном моменте инерции (= система координат смещена в центр тяжести)

Знак момента всегда определяется исходя из направления вращения вокруг локальной оси x . Вращение балки осуществляется по часовой стрелке, если

смотреть в направлении балки и против часовой стрелки, если смотреть на положительную грань балки. Сечения сохраняются в базе данных с учетом их положения в системе и контуров. Знак радиуса дуги окружности определяется как «+», если моделируемая площадь увеличивается относительно секущей, и «-», если площадь уменьшается, как в случае округления контура фигуры (кромки).

2.4 Нормальные напряжения

Несущую способность обычной балки без опоры на фундамент или основание, но с учетом деформации, согласно теории 1-го порядка, можно выразить в виде матрицы дифференциальных уравнений:

$$E \cdot \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & F_w \\ F_y & F_{yy} & F_{yz} & F_{yw} \\ F_z & F_{yz} & F_{zz} & F_{zw} \\ F_w & F_{yw} & F_{zw} & F_{ww} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} v_x^{II} \\ v_y^{IV} \\ v_z^{IV} \\ \vartheta_x^{IV} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ m_x + G I_t \vartheta_x^I \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

где, v_x, v_y, v_z – перемещения в системе, параллельные и перпендикулярные балке;

ϑ_x – вращение вокруг оси балки;

p_x, p_y, p_z – нагрузки, которые приложены параллельно и перпендикулярно к стержню;

m_x – нагрузка от действия кручения.

Остальные параметры – это статические свойства поперечного сечения (геометрические площади эюр моментов). Поскольку нецелесообразно учитывать все статические свойства при расчете системы, в большинстве случаев принимаются стандартные значения этих свойств:

- Осевое усилие приложено к центру тяжести балки, т. е.

$$F_y = F_z = 0 \quad (2.2)$$

- Изгиб происходит вокруг главной оси балки, т. е.

$$F_{yz} = 0 \quad (2.3)$$

- Деформация в поперечном сечении могут происходить свободно, т.е.

$$F_w = 0 \quad (2.4)$$

- Крутящий момент и сдвиговые усилия приложены к центру сдвига, т.е.

$$F_{yw} = F_{zw} = 0 \quad (2.5)$$

И наоборот, условия, представленные в виде формул 2.2-2.5, могут быть использованы для определения центра тяжести, ориентации главных осей, действительного значения деформации коробления и центра сдвига.

Определение площади эпюры моментов является относительно простым процессом и не должно быть описано в данном руководстве. При необходимости можно обратиться к любому другому методическому руководству по строительной механике.

Нормальные напряжения в поперечном сечении балки могут быть описаны при помощи формулы Суэйна (*Swain's*), а также позволяют нормировать/стандартизировать деформации коробления:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{(M_y I_z + M_z I_{yz})}{(I_y I_z - I_{yz}^2)} \cdot z - \frac{(M_z I_y - M_y I_{yz})}{(I_y I_z - I_{yz}^2)} \cdot y + \frac{M_b}{CM} \cdot w \quad (2.6)$$

2.5 Расчетная/эффективная ширина

Так называемые расчетные или эффективные ширины используются при моделировании эффектов, которые возникают из-за влияния на систему диафрагм жесткости в тавровых балках (*T-beam*) или, из-за наличия в системе элементов с коробчатым поперечным сечением. Концепция использования эквивалентной ширины с учетом постоянного значения нормального напряжения, естественно, требует разных подходов в зависимости от решаемой задачи (статические поправки, конструктивные поправки).

Расчетная ширина также используется и при работе с металлическими сечениями 4-ого класса (класс сечений согласно Еврокоду), в частях которых возможно наличие дефекта в виде прогиба или вмятины и, в которых не допускается наличие продольного напряжения.

Модуль *AQUA* может определять неэффективные области сечения при помощи прямоугольных областей с возможностью выбора уровня их эффективности, исходя из значений различных усилий или моментов, возникающих в сечении. Далее модуль *AQUA* сохраняет полученные значения свойств поперечного сечения и учитывает их влияние, как при моделировании общего поперечного сечения, так и при моделировании эффективного сечения.

Статический анализ в большинстве случаев проводится только относительно жесткости эффективных частей сечения, тогда как нормальное/осевое усилие (например, в предварительно-напряженных элементах) проходит через центр всего (общего) поперечного сечения элемента.

Для дальнейшего расчета необходимо объединить/суммировать влияние напряжений, возникающих от действия нормальных усилий в общем сечении, с напряжениями, которые возникают от действия изгибающих моментов в эффективном сечении.

По многим причинам неэффективные части сечения остаются эффективными при расчете напряжений сдвига. Но учитывая тот факт, что продольное напряжение в данном случае равно нулю, напряжение сдвига всегда имеет постоянное значение внутри элемента.

2.6 Напряжения при депланации и сдвиге

В случае возникновения депланации при кручении (первичного или вторичного) и сдвиговых усилий, поперечное сечение больше не остается плоским. Прогиб w , возникающий в поперечном сечении в продольном направлении, является причиной возникновения напряжений сдвига.

Все проблемы и трудности, связанные с применением теории упругости, могут быть проанализированы при помощи метода сил или метода перемещений.

Метод сил часто используется при ручном расчете, а метод перемещений лучше подходит для расчета систем при помощи компьютера. Оба метода расчета реализованы в модуле *AQUA* для анализа сплошных сечений. Данный тип сечений рассчитываются с использованием метода перемещений в режиме по умолчанию, а в частных случаях используется метод конечных элементов (*FEM*). В качестве альтернативы можно также задействовать метод граничных элементов (*BEM*). В случае применения тонкостенного типа сечений, нижеприведенные уравнения могут быть упрощены, что позволит облегчить поиск решения задачи и увеличить скорость расчета. Поэтому данные сечения всегда анализируются при помощи матричного метода перемещения.

Согласно методу перемещений, общая формулировка при наличии в поперечном сечении эффекта деформации w представлена в виде следующего равновесия

$$G \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \quad (2.7)$$

и граничных условий

$$\tau_{xy}n_y + \tau_{xz}n_z = 0 \quad (2.8)$$

где напряжения сдвига рассчитываются по следующим формулам

$$\tau_{xy} = G \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial y} - z \cdot \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} \right) \quad (2.9a)$$

$$\tau_{xz} = G \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial z} + y \cdot \frac{\partial \vartheta_x}{\partial x} \right) \quad (2.9b)$$

Правая часть равенства 2.7 может быть получена, например, из формулы 2.6. Предполагая, что значения нормального/осевого усилия и свойств поперечного сечения постоянны, мы получаем:

$$- \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{V_z I_z - V_y I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} \cdot z + \frac{V_y I_y - V_z I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2} \cdot y + \frac{M_{t2}}{CM} \cdot w \quad (2.10)$$

Эти уравнения будут соответствовать реальным значениям после анализа системы в модуле *AQUA*, либо после анализа методом граничных элементов (*BEM*), либо после анализа методом конечных элементов (*FEM*).

Учитывая проблему, связанную с кручением Сен-Венана ($\partial\theta_x/\partial\chi$), правая часть равенства 2.7 тождественна нулю и применяется при следующем граничном условии:

$$\frac{\partial w}{\partial n} = z \cdot n_y - y \cdot n_z . \quad (2.11)$$

2.7 Момент инерции относительно оси кручения

Момент инерции относительно оси кручения I_t по методу перемещения складывается из

$$I_t = \iint [y^2 + z^2 - (\partial w/\partial y)^2 - (\partial w/\partial z)^2] dF \quad (2.12)$$

На момент, когда модуль *AQUA* не решает дифференциальное уравнение 2.7, возможна только оценка момент инерции относительно оси кручения. Из последнего равенства следует, что полярный момент инерции анализируемого сечения может быть заменен на I_t , но только в случае отсутствия каких-либо деформаций в поперечном сечении

$$I_t \leq I_p = I_y + I_z . \quad (2.13)$$

Для всех сечений уравнение 2.13 задает верхний предел значения момента инерции I_t , которое, в качестве примера, примерно на 10% выше точного значения квадрата.

Наилучшее приближение (аппроксимация) к истинному значению достигается при использовании уравнения Сен-Венана:

$$I_T = \frac{A^4}{[4 \cdot \pi^2 \cdot (I_y + I_z)]} \quad (2.14)$$

Это уравнение идеально подходит для описания круговых и эллиптических сечений. Что касается компактных сплошных монолитных сечений, то данное уравнение описывает их с хорошей степенью точности – *good approximation*.

Однако при работе с сечениями незамкнутого контура целесообразно использовать коррекцию согласно методу У. Дж. Виенеке [1] с учетом значения периметра поперечного сечения, которое было введено в систему при помощи модуля *AQUA*.

Степень отклонения от реальных значений характеристик прямоугольных сечений со сторонами a и b представлена в таблице ниже:

a/b	1/1	2/1	10/1	
Требуемая степень отклонения	0,140	0,458	3,13	$\times b^4$
При использовании уравнения Сен-Венана	0,152	0,486	3,01	$\times b^4$
Метод коррекции У. Дж. Виенеке [1]	0,124	0,418	3,240	$\times b^4$

Для более точного анализа полых сечений, в которых 30% от всего сечения занимает внутренний периметр – отверстие или полость, используется эквивалентное сечение, которое моделируется исходя из значений внешнего и внутреннего периметров.

Для анализа композитных сечений используется уравнение 2.14. Данное уравнение позволяет проанализировать каждый отдельный участок составляющий сечение, а также учесть влияние добавленных компонентов.

2.8 Напряжения сдвига в сплошных монолитных сечениях

При расчете напряжений сдвига в сплошных монолитных сечениях с использованием модуля *AQUA* необходимо, чтобы пользователь определился с используемым методом расчета и расчетными положениями, которые ему потребуются для последующего анализа сооружения. Данная задача может быть

решена при помощи большого количества методов, которые контролируются командой *CTRL STYP*:

- CTRL STYP FEM* Метод конечных элементов – используется при расчете всех свойств поперечного сечения (по умолчанию)
- CTRL STYP FEMX* Метод конечных элементов, как и в предыдущем случае, но с дополнительной базой данных, в которой содержится информация по конечно-элементной сетке сечения. Данная информация расположена в отдельной подпапке
- CTRL STYP BEM 1* Метод граничных элементов используется только для определения параметра I_t и координат местоположения центра сдвига y_{sc}, z_{sc}
- CTRL STYP BEM 2* Метод граничных элементов используется для определения плоскости вращения при сдвиге, а также метод сил, который позволяет определить плоскость сдвига
- CTRL STYP BEM 3* Метод граничных элементов используется для определения плоскости вращения, а также плоскость деформации при сдвиге
- CTRL STYP FORC* Метод сил

Примечание

По умолчанию в версии ПК *SOFiSTiK 2014* используется метод *CTRL STYP BEM*

При анализе трещиностойкости (состояние II согласно Еврокоду) модуль *AQB* всегда использует метод сил с учетом значения пропорционального осевого усилия. При работе с композитными поперечными сечениями методы *BEM 2* и *BEM 3* следует использовать с осторожностью. Как правило, для расчета необходимо явное задание сдвигового усилия в сечении.

2.8.1 Метод конечных элементов – FEM

Основы

Метод конечных элементов для расчета сплошных (толстостенных) сечений является наиболее инновационным методом, который использует плоскую 2D дискретизацию области поперечного сечения, что позволяет выразить главное дифференциальное уравнение депланации в виде дискретной системы уравнений с учетом связности конечно-элементной сетки (модуль AQUA генерирует только пластинчатые четырехугольные «QUAD» элементы сетки). Модуль AQUA рассчитывает четыре главных источника возникновения депланации ($M_{T1} = 1,0$, $V_y = 1,0$, $V_z = 1,0$ и $M_{T2} = 1,0$), из значения которых определяется распределение сдвиговых напряжений, возникающих при каждом отдельном условии нагружения. Значения данных расчетных характеристик в дальнейшем используются для получения значений других характеристик, таких как:

- I_T сопротивление кручению (при действии первичного момента M_{T1})
- C_m сопротивление деформации коробления (при действии бимоментов M_b)
- C_{ms} сопротивление деформации коробления при сдвиге (при действии дополнительного (вторичного) момента M_{T2})
- A_y деформированная площадь (плоскость) при сдвиге в направлении оси y (при действии V_y)
- A_z деформированная площадь (плоскость) при сдвиге в направлении оси z (при действии V_z)
- A_{yz} деформированная площадь (плоскость) при сдвиге в плоскости yz
- y_{sc}, z_{cs} координаты центра сдвига
- w_{min}, w_{max} максимальное и минимальное значение депланации
- предельные значения таких параметров, как $A_{wy}, A_{wz}, A_{wyy}, A_{wzz}, r_y, r_z$, определяются в процессе анализа второго порядка

Примечание

При расчете всех многоугольных сплошных (толстостенных) сечений в версии ПК *SOFiSTiK* 2016 метод конечных элементов *FEM* установлен по умолчанию

При необходимости пользователь может переключиться на любой из используемых *SOFiSTiK* методов анализа сечений при помощи команды *CTRL*. Смену метода анализа можно осуществить до создания поперечного сечения или в редакторе поперечного сечения.

Также стоит отметить, что расчетный файл с сечениями, созданными в версии ПК *SOFiSTiK* 2014, при открытии в версии 2016, будет автоматически преобразован (по умолчанию) с учетом результатов, полученными при анализе методом *FEM*, по следующей схеме:

<i>CTRL STYP 0</i>	→	<i>CTRL STYP FORC</i>
<i>CTRL STYP 1 до 3</i>	→	<i>CTRL STYP FEM</i>
<i>CTRL STYP 15</i>	→	<i>CTRL STYP FEMX</i>
<i>CTRL STYP 5</i>	→	<i>CTRL STYP BEM 1</i>
<i>CTRL STYP 6</i>	→	<i>CTRL STYP BEM 2</i>
<i>CTRL STYP 7</i>	→	<i>CTRL STYP BEM 3</i>

Основные преимущества

Метод конечных элементов имеет ряд преимуществ по сравнению с методами, которые ранее использовались в модуле *AQUA*:

- обеспечивается более стабильный и тщательный подход при расчете упругости при влиянии кручения, сдвиговых усилий и деформаций коробления с учетом характеристик сечения и напряжений
- обеспечивается нелинейный последовательный подход при расчете пластических и других нелинейных свойств сечения. Метод *FEM* позволяет получить наиболее реальные значения пластических сдвиговых усилий и пластических моментов кручения

- обеспечивает более точную оценку значений упругих предельных усилий N_{el} , $M_{y,el}$, $M_{z,el}$, $M_{b,el}$ для общих поперечных сечений
- позволяет непосредственно рассчитать абсолютно произвольную геометрию сечения, а также сложные горячекатаные металлические профили при помощи модуля *HYDRA* (температурный анализ по времени)
- обеспечивает симметричное распределение конечно-элементной сетки относительно одной или двух осей симметрии, обеспечивая тем самым сохранение симметрии между значениями результатов анализа и уменьшение разницы между значениями производных (центр масс, центр сдвига, точки симметричного деформирования и т. д.)
- позволяет детально визуализировать реакцию элемента (сечения) на действия загрузки (отображение напряжений и деформаций в графическом виде при помощи модулей *WINGRAF / Result Viewer*)

Как и в других методах, пользователь может собственноручно задать неэффективные участки сечения, различные изотропные/анизотропные материалы, плоскость сдвига, армирование и этапы возведения сооружения, которые должны учитываться при построении и разбиении конечно-элементной сетки, интерполяции, расчете и последующей обработке модели.

Второстепенная база данных (*CDB – Characteristic Data Bank/база данных значений*)

При активации расширенной версии команды управления *CTRL STYP FEMX* сгенерированная конечно-элементная сетка поперечного сечения сохраняется в базе данных, которая находится в подкаталоге (подпапке), относящемся к проекту, озаглавленном, как *projectname_sections*. Например, Сечение 1 будет сохранено в следующей базе данных: *projectname_sections\section_0001.cdb*. Созданная база данных является очень важной, так как сохраненные в ней значения необходимы для расчета и термического анализа системы в модуле *HYDRA* или расчета колонн/столбов. Не рекомендуется активировать данную

функцию программы, если вам не требуется рассчитать физические характеристики элемента, поскольку это может потребовать значительного дополнительного пространства на жестком диске и времени для записи полученных результатов. Из соображений оптимизации времени расчета, по умолчанию, установлена функция *CTRL STYP FEM*, гарантирующая, что сетка для каждого поперечного сечения будет создана и сохранена только в течение периода анализа.

Для свободно заданного поперечного сечения базы данных с конечно-элементными сетками можно также импортировать в модуль *AQUA* при помощи команды *SECT FEM*. Пользователю также разрешено импортировать системы сечений, объединенные в модуле *SOFiMSHC 2D*, в целом или сгруппированные по тому же принципу.

Графическое отображение результатов

Если параметр *SECT LTAU* задан пользователем собственноручно, то модуль *WINGRAF* может получить доступ к вторичной базе данных *CDB*, в которой содержатся параметры сетки, что позволит визуализировать сохраненные в базе данных значения сдвиговых напряжений, распределенных по всей области поперечного сечения. Затем, четыре эпюры сдвиговых напряжений ($M_{T1} = 1,0, V_y = 1,0, V_z = 1,0, M_{T2} = 1,0$), полученные в результате расчета, группируются, как и загрузки *LC* – группировка начинается с уже ранее определенного номера загрузки *LTAU*, а номера последующих загрузок увеличиваются на единицу относительно предыдущего. В дополнении к этому модуль *WINGRAF* позволяет определить плоскости среза (сдвига) в сечении, вдоль которых во всех красках могут быть отображены все необходимые результаты.

Помимо модуля *WINGRAF* для общего визуального анализа системы может быть использован модуль *ANIMATOR*. В большинстве случаев модуль *Result Viewer* (Отображение Результатов) для показа всегда выбирает приграничные деформации/напряжения вдоль тех четырех граней, которые являются частью

границ анализируемого участка, а затем представленные результаты сохраняются в главной базе данных под отдельной ячейкой дерева проекта.

Примечание

Явно заданные концентраторы напряжений и одиночные арматурные стержни не обязательно должны быть объединены в составе *FE* сетки таким образом, чтобы модуль *AQUA* всегда создавал *FE* узел (конечно элементный узел) в этих местах. Поэтому, результаты в этих точках в большинстве случаев получают путем интерполирования результатов, относящихся к окружающим ее плоскостям (*quads*).

Качество сетки

Качество анализа конечно-элементной сетки *FEM* полностью зависит от того, насколько точно и детально дискретизирована исходная (базовая) модель, т. е. от количества плоских *quad* элементов, из которых состоит элементная сетка. По умолчанию модуль *AQUA* стремится построить достаточно рациональную сетку, которая позволила бы получить достаточно точные, в плане механики, результаты, исходя из упругих и пластических характеристик поперечного сечения, особенно это касается профильной стали. Следует, однако, отметить, что последнее требование очень сложно выполнить при любых исходных данных. Это связано с вопросом компромисса между обеспечением нужной точности, временем расчета системы и предъявляемым к расчету требованиям. Геометрические сложные, особенно, многосоставные/многокомпонентные составные сечения, могут потребовать для их расчета дальнейшего сгущения сетки в зонах концентрации напряжений, в зонах контакта/на границе раздела и в местах закругления/плавного перехода. То же самое относится к сечениям, которые впоследствии подвергаются термическому анализу/расчету в модуле *HYDRA*, где приемлемые результаты могут быть получены только с более мелкой конечно-элементной сеткой. Перед разбиением сетки на модели модуль *AQUA* для

каждого участка анализируемой области определяет соответствующий размер ячейки, который должен выражаться в виде параметра «*h-value*».

Примечание

Конечно-элементная сетка *FEM*, построенная в плоскости поперечного сечения модулем *AQUA*, настройки в котором установлены по умолчанию, в большинстве случаев является достаточно точной для получения рациональных результатов, в плане механики, исходя из упругих и пластических характеристик.

Для случаев, когда для системы требуется обеспечить более плотную или укрупненную сетку, в программу включена функция управления, при использовании которой пользователь может:

- Разложить параметры «*h-value*» всех геометрических областей при помощи того же ранее заданного параметра *CTRL HDIV* [-]. Например, значение коэффициента, равное *CTRL HDIV 0,5*[-], означает, что каждая подобласть рассматриваемого участка сечения, должна быть уменьшена до 50% относительно первоначально заданной плотности конечно-элементной сетки – *AQUA*-сетки. Такой же эффект может быть достигнут при помощи альтернативного ввода – 50 [%]. Также могут быть введены значения коэффициента, превышающие 1,0 [-] или 100 [%] – увеличение подобласти.
- Прямой ввод общего размера ячейки конечно-элементной сетки *CTRL HDIV* [мм или м]. В данном случае модуль *AQUA* определяет отношение введенного значения к рассчитанному внутри системы значению параметра «*h-value*» и далее полученное значение рассматривается системой, как коэффициент для данной области.

Программа позволяет контролировать размеры ячеек сетки. Для этого модуль *AQUA* имеет фиксированные допустимые внутренние пределы в диапазоне [0,1 ... 5,0] или [10% ... 500%]. Любое значение, введенное за пределы этой области, запустит в программе процесс перемасштабирования сетки до ее ближайшего предела, и программа выдаст предупреждение.

В целом, рекомендуется использовать первый вариант (*CTRL HDIV[-]*), поскольку оценка значений параметра «*h-value*» довольно громоздка и является функцией нескольких сложных постоянных критериев.

Примечание

Уплотнение конечно-элементной сетки может привести к увеличению времени анализа системы, образованию громоздких баз данных и избыточному выводу данных.

Чтобы избежать различных проблем с сеткой, следует иметь в виду, что многоугольники не должны пересекаться друг с другом в одной или нескольких особых точках. Вполне возможно, что при использовании других методов разбиения сетки многоугольные ячейки смогут пересечься друг с другом, но при условии, если пересечения будут непрерывными, а созданные точки пересечения не будут особыми точками.

Методы интегрирования элементов системы

При интегрировании любых свойств конечных элементов *FE* расчетной системы, в модуле *AQUA/AQB* всегда используется метод интегрирования Лобатто (*Lobatto integration scheme*). Для некоторых особых случаев дополнительные методы интегрирования доступны при помощи команды *CTRL SINT*. Возможные варианты интегрирования свойств элементов:

- 1 Метод интегрирования, использующий только квадрат значений средних точек (полезен при мелких/плотных сетках)
- 2 Метод интегрирования с использованием только четырех узлов
- 3 Метод интегрирования Лобатто с учетом узлов и квадратов средних значений (по умолчанию)

Примечание

Всегда рекомендуется использовать метод интегрирования Лобатто (настройка по умолчанию). В данном методе достижение оптимального по точности результата осуществляется за счет пренебрежимо длительного времени расчета системы. Тем не менее, пользователь должен знать, что данный метод обеспечивает наибольшую производительность, как при анализе узлов четырехугольной ячейки сетки *FEM*, так и при анализе срединных точек четырехугольных ячеек. Результаты такого анализа дополнительно сохраняются в базе данных программы.

Расширенный анализ конечно-элементной сетки *FEM*

Метод *FEM* также позволяет учесть несколько более сложные эффекты, таких как пластичность, при анализе поперечного сечения:

1 *CTRL OPT PLAS*

Анализ сдвига с учетом пластических свойств ($M_{T1, pl}$, $V_{y, pl}$, $V_{z, pl}$, $M_{T2, pl}$) для массивных (сплошных) сечений является сложной задачей, особенно если эти значения должны быть рассчитаны максимально точно, в плане механики. Следует отметить, что в реальных производственных условиях сдвиг не существует сам по себе, а пластические характеристики, необходимые для моделирования взаимодействия и проверок, часто носят спорный характер, и во многих случаях рекомендуется ссылаться на стандартные табличные значения. Существует несколько ресурсов на эту тему, но почти во всех случаях инженеры должны принять адекватное решение относительно того, какие пластические усилия и моменты будут в основном соответствовать его требованиям. Чтобы это разрешить, в модуле *AQUA* для команды *CTRL OPT PLAS* были реализованы следующие три метода:

0 принимаются все пластические характеристики из стандартных таблиц поперечного сечения

1 рассчитываются свойства пластического сдвига, используя *FE*-метод масштабирования потока упругих сдвиговых напряжений (по умолчанию)

2 рассчитываются свойства пластического сдвига, используя нелинейное приращение перемещений, управляемое *FEM* методом

+1*16 заменить текущие методы расчета пластических усилий $V_{y, pl}$ и $V_{z, pl}$, на метод, в основе которого заложено масштабирование областей упругих деформаций при сдвиге

Важно отметить, что:

- Стандартные стальные (сплошные или *AQUA-light solid*) профиля *PROF* получают свои пластические характеристики, по умолчанию, непосредственно из таблиц:

SECT 1 MNO 1

PROF 1 TYPE IPE 300 DTYP S

SECT 2 MNO 1

PROF 2 TYPE IPE 300 DTYP TABS

PROF 3 MNO 1 TYPE IPE 300

PROF 4 MNO 1 TYPE IPE 300 DTYP S

PROF 5 MNO 1 TYPE IPE 300 DTYP TABS

Значения берутся из таблиц независимо от того, были ли введены рассматриваемые металлические профили в составе команды *SECT* или нет. В приведенном выше примере все 5 сечений должны рассматриваться одинаково с точки зрения упругого и пластического расчета. Принудительное использование команды *CTRL PLAS 0* в данном случае не требуется – никакого эффекта за этим не последует. При вводе команд *PLAS 1* и *PLAS 2* их действие будет подавлено программой.

- Сечениям, введенным в систему собственноручно при помощи команды *SECT*, присваиваются свои пластические характеристики по умолчанию в соответствии с методом, по которому они были рассчитаны:

```
CTRL STYP FEM
```

```
CTRL PLAS 2
```

```
SECT 6 MNO 1
```

```
    PROF 6 TYPE IPE 300
```

```
    POLY OPZ MNO 2
```

```
    VERT 1 200 -200
```

```
    VERT 2 200 +200
```

```
CTRL STYP FEMX
```

```
CTRL PLAS 17
```

```
SECT 7 MNO 1
```

```
    PROF 7 TYPE IPE 300
```

```
    POLY OPZ MNO 2
```

```
    VERT 1 200 -200
```

```
    VERT 2 200 +200
```

```
CTRL STYP BEM 3
```

```
SECT 8 MNO 1
```

```
    PROF 8 TYPE IPE 300
```

```
    POLY OPZ MNO 2
```

```
    VERT 1 200 -200
```

```
    VERT 2 200 +200
```

В приведенном выше примере сечение 6 анализируется при помощи конечно-элементной сетки *FEM* (применяется по умолчанию, если не указано иное) с принудительным использованием метода, основанного на теории

пластичности материала *PLAS 2*. Сечение 7 также будет анализироваться с помощью сетки *FEM* при условии обязательного использования стандартного метода *PLAS 1* (применяется по умолчанию, если не указано иное) с учетом плоскостей, в пределах которых возникает упругий сдвиг для расчета пластических параметров $V_{y,pl}$ и $V_{z,pl}$. Сечение 8 рассчитывается с помощью граничных элементов *BEM* (*Boundary Element Method* – Метод Граничных Элементов), поэтому использование команд *PLAS*, которые применяются при анализе сечений с помощью сетки *FEM*, не уместно в данном случае.

Если для трех сечений, рассмотренных выше, функция программы *CTRL PLAS 0* активирована пользователем собственноручно, то в результате анализа сечений 6 и 7 пользователь получит значения пластических характеристик только для стальных прокатных элементов, заданных в системе при помощи команды *PROF*. При данном расчете не учитываются какие-либо дополнительные элементы, введенных в состав сечения, которые могут привести к неправдоподобно малым (опасным) и, следовательно, ошибочным значениям пластических характеристик сечения. Таким образом, пользователям рекомендуется использовать функцию *PLAS 0* только в тех случаях, когда необходимо проанализировать одно сечение прокатного стального элемента. В заключение необходимо отметить, что сечение 8 в данном расчете учитываться не будет.

- Любое из полученных при расчете в модуле *AQUA* значений пластических характеристик может быть перезаписано или изменено по мере необходимости в соответствии с параметрами команды *SV*.

В модуль *AQUA* также включен ускоренный алгоритм для расчета свойств, связанных с пластическим сдвигом, с использованием нелинейного приращения перемещений, контролируемого при помощи *FEM*. Нелинейное приращение заключается в том, что к главной оси поперечного сечения прикладывается удельная (единичная) кинематическая деформация, а затем постепенно приложенная деформация увеличивается до момента, при котором

в сечении возникают конечные пластические деформации (предел текучести), то есть момент, в котором тангенциальная упругопластическая жесткость сечения существенно не изменяется с увеличением деформации. Окончательное (полное) значение пластических деформаций в анализируемом сечении не обязательно означает, что все точки Гауссовского пространства достигают пластичности. На сегодняшний момент, используемый программный алгоритм расчета, позволяет определить последовательные упругопластические равновесные состояния системы, используя основной метод расчета, и получить результирующие значения пластических усилий/моментов, жесткости, остатки и добавленные (приращенные) деформации. Всякий раз, когда итеративные приращения находятся в пределах небольших допусков, алгоритм считается сходимым, а значения параметров пластичности сохраняются в базе данных. В процессе анализа функция программы *WPS* должен обеспечивать корректный вывод результатов. Рассматриваемый алгоритм позволяет рассчитать как собственные (нормативные), так и проектные пластические характеристики сечения. В процессе анализа алгоритм игнорирует неэффективные части системы и этапы ее возведения, т. е. сходящиеся параметры пластичности относятся только к окончательному поперечному сечению.

Для текущей реализации свойств пластичности *CTRL PLAS 2* алгоритм использует модель *Mises2D* для изотропных/анизотропных стальных и бетонных материалов (по умолчанию) и модель *Tsai-Wu2D* для анизотропных древоподобных материалов с учетом пластических деформаций и их развития.

Для визуализации пластически деформированных элементов поперечного сечения (с помощью модуля *WINGRAF*) соответствующие группы вторичных элементов генерируются автоматически в базе данных анализируемого сечения. Последние генерируются автоматически при условии, если команды *STEU PLAS 2*, *STEU STYP FEMX* и дополнительная функция *QNR LTAU* активируются для текущего поперечного сечения. Условие по наименованию вторичных групп элементов основано на обозначении рассчитанного модулем *AQUA* пластического

усилия с добавлением индекса, описывающего текущее состояние системы (f_{yd} = проектное (расчетное) состояние, f_{yk} = собственное (нормативное) состояние).

Пример, приведенный ниже, иллюстрирует активацию высокоскоростного алгоритма расчета сечений с условием принудительного изменения рассчитанных пластических сдвиговых усилий, которые были получены из областей упругого сдвига.

Файл с примером: [aqua.dat/english/plastic.dat](#).

Примечание

Обратите внимание, что команда/метод *CTRL PLAS 2* в настоящее время находится на стадии разработки. Поэтому настоятельно не рекомендуется полностью полагаться на полученные результаты, хотя метод основан на достаточно точных допущениях и условиях, представленных в строительной механике. В зависимости от размера ячейки сетки и сложности поперечного сечения время анализа может сильно различаться и влиять на скорость вычислительного процесса. Конвергенция/сходимость результатов расчета также не гарантируется при любых других обстоятельствах.

Термический анализ при помощи конечно-элементной сетки *FEM*

Конечно-элементная сетка *FEM* может быть использована для независимого термического анализа (модуль *HYDRA*) элемента с сечением произвольной формы и выполненного из любого материала. Для получения более подробной информации об основах термического анализа в ПК *SOFiSTiK* пользователю рекомендуется ознакомиться с руководством по модулю *HYDRA* и, в частности, с правилами использования команд *SECT* и *MEXT* в модуле *AQUA*.

2.8.2 Метод граничных элементов

При анализе системы с использованием метода перемещений используется либо метод конечных элементов, либо метод интегральных уравнений,

называемый также методом граничных элементов, разработанный Кацем [2]. При использовании первого метода конечно-элементная сетка может быть импортирована или сгенерирована автоматически в модуле *AQUA*. При использовании второго метода контур поперечного сечения определяется из нескольких так называемых «граничных элементов». Деформации каждого такого элемента рассматриваются (анализируются) в линейной постановке задачи, а граничные условия формируются из взвешенного остатка Галеркина (*Galerkin weighted residual*).

Оба метода позволяют определить функцию деформации, исходя из характеристик рассматриваемого поперечного сечения элемента. Пользователь, основываясь на полученной в результате анализа системы функции, может определить сдвиговые напряжения, возникающие в результате действия сдвиговых усилий и кручения. Вдобавок ко всему перечисленному, пользователь может определить значения всех характеристик сечения, таких как момент инерции вращения, расположение центра сдвига и областей, в которых возникают сдвиговые деформации.

Количество граничных элементов определяет точность полученного результата. Например, в случае с элементом квадратной формы боковая удельная депланация по всем осям симметрии равна нулю. Учитывая данную особенность, для получения результата расчета отличного от нуля, необходимо, по крайней мере, задать расчетное сечение в виде четырех граничных элементов, расположенных на каждой стороне расчетного сечения. В процессе расчета модуль *AQUA* рассматривает каждый край (ребро) многоугольника как один элемент, который впоследствии может быть разделен на дополнительные элементы в зависимости от его размера. Дублирующие ребра автоматически удаляются. Поскольку результаты расчета по краям будут меняться только по линейному закону, настоятельно рекомендуется использовать вводные команды *CTRL HMIN* или функцию *SMAX* в составе команды *POLY*, чтобы полученные значения были более видимы в отчетной документации – визуальное укрупнение значений.

Однако, для получения более реальной картины работы системы необходимо более детализированное разбиение системы. Так как расчет более детализированной системы требует в два или три раза больше производственных мощностей ПК и времени, следует подходить к этому вопросу с умом. Пользователь может собственноручно контролировать как абсолютный размер ячейки сетки, так и ее относительный размер при помощи команд *CTRL HDIV* и *CTRL SDIV* соответственно.

<i>CTRL SDIV 0</i>	Без детализации системы
<i>CTRL SDIV 1</i>	Максимум на 1/2 от размера элемента
<i>CTRL SDIV 2</i>	Максимум на 1/4 от размера элемента
<i>CTRL SDIV 3</i>	Максимум на 1/8 от размера элемента
<i>CTRL SDIV 5</i>	Максимум на 1/16 от размера элемента
<i>CTRL SDIV 5</i>	Максимум на 1/32 от размера элемента

Качество и правдоподобность результатов, полученных при использовании данного метода, зависит от многих факторов, так что не стоит относиться к ним без какой-либо критики или проверки, опираясь на собственный опыт в расчетах и проектировании инженерных сооружений. Данный метод является численно приближенным. Например, действие локальных сдвиговых напряжений во внутренних углах расчетного сечения может стать причиной возникновения довольно больших по значению напряжений.

2.8.3 Метод сил

Метод сил в модуле *AQUA* используется только для «статически определимых», то есть односвязных сечений. Для обеспечения связи нескольких сечений пользователь должен знать расположение нулевого сдвигового напряжения или задать распределение сдвига по нескольким сегментам анализируемой плоскости – стыки между сечениями. Учитывая тот факт, что рассматриваемый метод обычно используется для расчета трещин, образуемые в

пределах анализируемого сечения, в любом случае потребуются данные по распределению значений сдвиговых напряжений – это касается сечений из железобетона. Однако, метод перемещений позволяет рационально оценить реакцию системы при воздействии на нее различных нагрузок.

Анализ напряжений, возникающих при кручении, не является равномерным даже для метода сил (функция распределения напряжений выполнена согласно пленочной аналогии). Поэтому область сопротивления сдвиговым напряжениям, возникающим при кручении, определяется двумя параметрами для каждого сечения. Первый параметр определяет напряжение сдвига в середине анализируемой плоскости – τ_m . Второй параметр определяет увеличение вдоль анализируемой плоскости – $\Delta\tau$:

$$\tau_m = M_t \cdot WT_m \quad ; \quad \Delta\tau = M_t \cdot WT_d \quad (2.15)$$

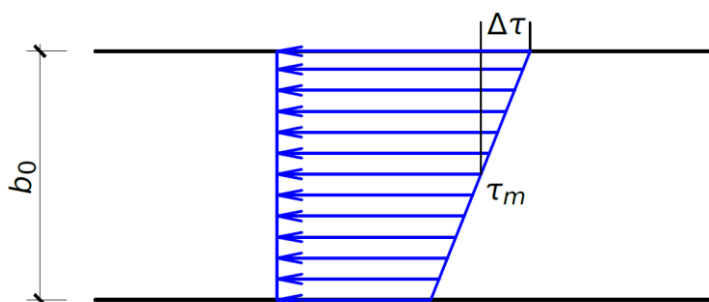


Рис. 2.2 – Плоскость действия сдвиговых напряжений

По умолчанию используется одно из следующих двух значений, в зависимости от того, является ли поперечное сечение полым или эквивалентным полному сечению:

$$WT_m = \frac{1}{(2 \cdot A_k \cdot b_0)} \quad ; \quad WT_d = \frac{1}{I_t} \cdot \min(b, d) \quad (2.16)$$

Знак сдвиговых напряжений определяется исходя из расположения анализируемой плоскости относительно центра сдвига.

Составляющие сдвигового усилия рассчитываются по классической формуле:

$$\tau = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{b} \quad (2.17)$$

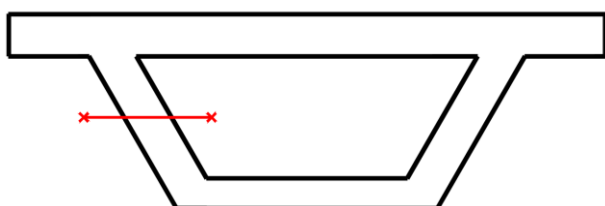
Однако, каждое из четырех исходных значений, представленных в формуле 2.17, не соответствует реальной картине:

- Параметр V справедлив только при расчете призматических балок с постоянным значением осевого (нормального) усилия
- Значение параметра I должно быть обобщено при помощи формулы Суэйнса
- Значение параметра S отдельной части сечения не известно при нескольких объединенных сечениях.
- Напряжение сдвига не обязательно должно быть постоянным по всей ширине b

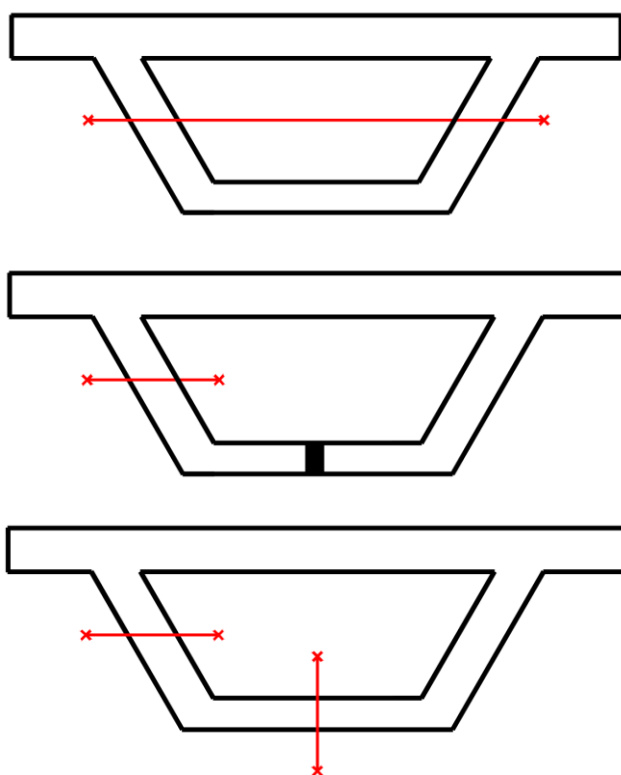
Отделенная часть поперечного сечения опирается на положительную грань, которая расположена слева от направления сдвига на положительной стороне. В процессе расчета программа автоматически заполняет любые отсутствующие участки анализируемого сечения. Поэтому для получения рациональных результатов чрезвычайно важным процессом является правильный ввод сечений в систему, а особенно обеспечение их последовательности (порядка, очередности).

В особых случаях, например, когда при расчете необходимо учесть швы (соединения, стыки, сочленения), вычитаемые площади, эквивалентные полые сечения, многосвязные поперечные сечения и т. д., параметры, составляющие сдвиговое усилие, для каждого участка плоскости сдвига могут быть учтены в расчетной системе в виде коэффициента (фактора).

Многосвязные поперечные сечения требуют особого внимания от пользователя:



Не разрешено, без разделения.



Разрешено, сдвиговое усилие распределяется справа и слева. Не оптимально при действии двухосной нагрузки.

Разрешено, однако, контур плоскости сдвига должен располагаться в нулевой точке сдвигового усилия. Не подходит при действии двухосной нагрузки.

Разрешено, однако, пользователь должен указать компонентные факторы сдвига. Подходит при действии двухосной нагрузки.

Рис. 2.3 – Плоскость действия сдвиговых напряжений в полах поперечных сечениях

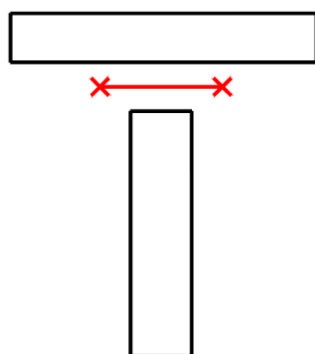
Подобная сложность встречается и при анализе поперечных сечений, состоящих из нескольких многоугольных элементов, либо из замкнутых элементов, либо из композитных поперечных сечений, которые ранее не были разъединены многоугольной плоскостью сдвига. В таких случаях модуль *AQUA* анализирует все точки многоугольника, чтобы определить, находятся ли они внутри или на границе уже проанализированного участка сечения. Учитывая данный факт, отверстия в сечении должны всегда вводиться в систему, исходя из расположения окружающих его многоугольных элементов. В случае же с композитными поперечными сечениями, полезно будет обратить внимание на направление действия плоскости сдвига или последовательность многоугольников.

При задании плоскости сдвига, проходящей через толщи нескольких материалов, пользователь должен следить за тем, чтобы каждый сегмент плоскости сдвига имел правильный номер материала, т. к. данная плоскость будет проходить только через части с одинаковым номером материала. Это имеет

особое значение при расчете влияния горизонтального сдвига в композитных поясах (подошвах рельса, загибах, отгибах, борт), если стяжка (шпилька, стяжная скоба, штифт) находится перед или позади плоскости сдвига.

Площади сдвига, проходящие через поперечные сечения в местах с «открытым пространством» – между элементами никак не связанных между собой в составе сечения, не могут быть проанализированы, так как в этих характерных местах не располагаются никакие элементы. Похожая проблема возникает в случае, когда плоскость сдвига имеет неправильный номер материала. В большинстве случаев это возникает при прохождении плоскости сдвига через центр тяжести.

Дополнительные рекомендации относятся к наклонным плоскостям сдвига. Поскольку сдвиговое усилие при использовании наклонной плоскости существенно не изменяется по сравнению с прямой плоскостью, значение ширины плоскости сдвига изменяется. Учитывая данный факт можно сделать вывод, что неправильный выбор направления плоскости сдвига может привести к анализу слишком малых и неправдоподобных значений сдвиговых напряжений.



Не разрешено, так как плоскость сдвига не пересекается с элементами поперечного сечения.

Рис.2.4 – Особый случай

В процессе анализа напряжений при помощи метода перемещений всегда рассматривается поперечное сечение брутто (без учета отверстий), тогда как при использовании метода сил рассматривается только эффективная (задействованная) часть сечения. Последнее установлено в программе по умолчанию. Но при помощи команды **CTRL SCUT +8** пользователь может переключиться с эффективного сечения на сечение брутто, если это необходимо.

2.8.4 Эквивалентное полое поперечное сечение

По нормам *DIN 1045* пользователь все еще может рассчитать значения крутильных напряжений в соответствии с I состоянием (без учета развития трещин), в то время как по нормам *DIN 4227*, так и *EC2* пользователь может рассчитать значения рассматриваемых напряжений в эквивалентном полем поперечном сечении. Для расчета модуль *AQUA* не использует методы *FEM* или *BEM*, а использует метод сил в сочетании с параметрами введенного в систему эквивалентного полого сечения.

2.8.5 Плоскость сдвига/среза

Пользователь обычно использует команду *CUT* для задания так называемой плоскости сдвига/среза, проходящей через сечение, в пределах которой должен выполняться анализ сдвиговых напряжений. Каждой плоскости присваивается идентификатор, который состоит из трех символов. Плоскость сдвига можно задать параллельно оси или при помощи полигональных линий в свободной форме. Каждый сегмент сечения имеет свой собственный номер материала, а плоскость сдвига будет пересекать элементы поперечного сечения только с одинаковыми номерами материала. Пространства между сегментами анализируемого сечения будут закрыты посредством виртуальных соединений/связей. Параметр ширины таких переходных участков поперечного сечения при действии кручения рассматривается системой в качестве специального параметра/функции для описания армированных эквивалентных полых сечений и предварительно напряженного бетона. В этом случае в каждом анализируемом сечении вместо одной цельной плоскости генерируются две плоскости сдвига/среза.

Если пользователь не ввел в систему каких-либо определенных параметров, то через центр тяжести сечения, автоматически, будет пропущена одна или две параллельные плоскости сдвига. Этого количества, как правило, недостаточно

даже для анализа простой балки таврового сечения (*T-Beam*) или композитных сечений, где номер стандартного (из справочника) материала, из которого изготовлено сечение элемента, может быть не отображен в системе. Учитывая данные факты, в случае анализа обыкновенных сечений элементов система выдаст пользователю предупреждение.

Команда *CTRL SCUT* позволяет пользователю контролировать, сколько из этих стандартных плоскостей сдвига будет сгенерировано в системе (0/1/2).

Плоскость сдвига может проходить через поперечное сечение в нескольких местах, создавая тем самым отдельные участки плоскости сдвига. Каждый такой участок плоскости характеризуется направлением s и тремя точками: начало (A), середина (M) и конец (E):

Внутренние усилия M и N , действие которых направлено перпендикулярно плоскостям сдвига (рис. 2.5), действуют таким образом, что положительные осевые усилия вызывают растягивающие напряжения поперек плоскости сдвига, а положительные моменты вызывают растягивающие напряжения в конечной точке.

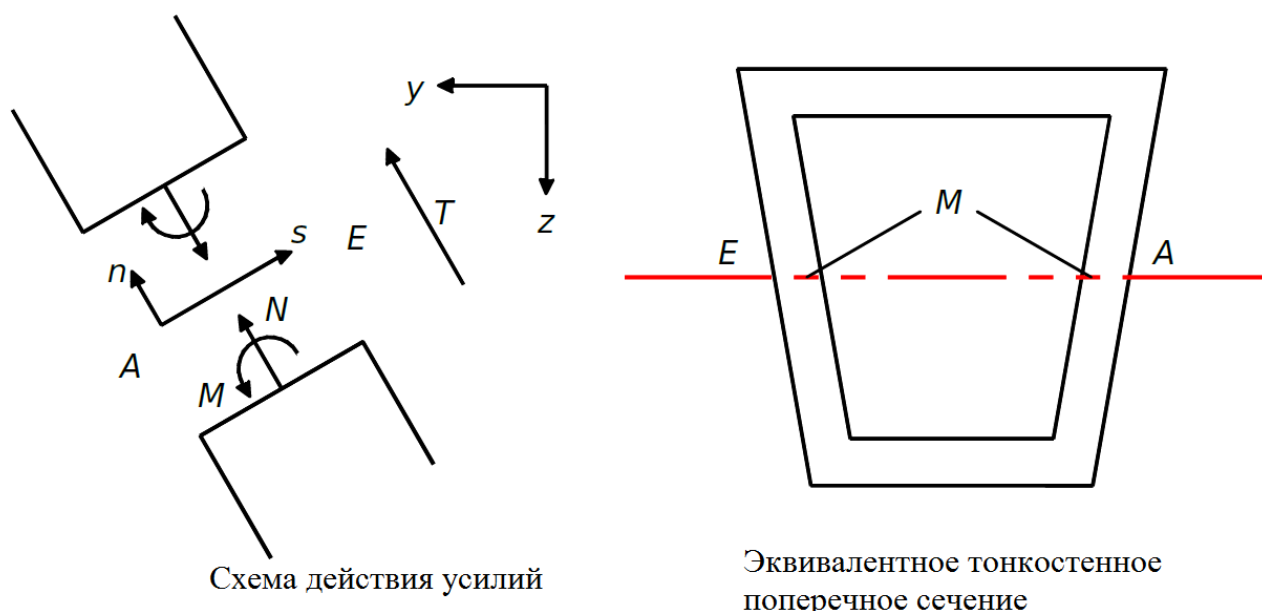


Рис. 2.5 – Анализ плоскости сдвига

Распределение напряжений, образуемых при сдвиге, характеризуются главным образом модулями упругости при сдвиге (модуль сдвига, жесткость на

сдвиг) в трех точках. Дополнительные значения характеристик сечения рассчитываются при проектировании соединений в железобетонных конструктивных элементах:

- После умножения среднего значения напряжения сдвига, возникающего при кручении, на значения параметра ширины, анализируемого участка сечения, должна быть установлена степень укрепления (армирования) элемента. Это соответствует осевому моменту сопротивления сечения при действии сдвигового потока (потока сдвиговых напряжений, поток сдвиговых усилий).
- Значение ширины общей плоскости сдвига должно быть перемножено на значения сдвиговых напряжений, зависящих от значения действующих сдвиговых усилий, для получения сдвигового потока (потока сдвиговых напряжений, поток сдвиговых усилий), возникающего от действия сдвиговых усилий.

Эти различия очень важны для задания/определения эквивалентных полых сечений.

2.9 Напряжения сдвига в тонкостенных сечениях

Расчет сдвиговых напряжений в тонкостенных сечениях намного проще, чем их расчет в сплошных (монолитных) сечениях, т. е. имеется возможность поиска более лаконичного решения, которое бы не зависело от разбиения элементов. Теоретическая основа для решения данной задачи представлена в источнике [3].

Для упрощения конечно-элементной модели *FE* тонкостенного сечения во всех случаях модуль *AQUA* использует метод деформации. Команда *CTRL STRL* в данном случае не имеет никакого влияния, но вы можете указать явные значения при помощи команды *SV*.

2.10 Пластические усилия

Подробный расчет пластических усилий является очень сложной задачей. Одиночные значения каждой составляющей рассматриваемого усилия могут быть легко проанализированы, но анализ их (сил и моментов) одновременного воздействия на систему является довольно объемной задачей. При помощи модуля *AQUA/AQB* пользователь может выбрать один из следующих вариантов решения:

- Оценка при стандартных сечениях (*AQUA-Light Version*)

Нормальные (осевые) усилия и изгибающие моменты, возникающих на этапе пластических деформаций, могут быть проанализированы с достаточной точностью. На этапе пластических деформаций для сдвигового усилия $V_{y,pl}$ значение площади сдвига берется в соответствии с Еврокодом с учетом дополнительных площадей от закругленных (сглаженных) участков элемента. Данный подход является нетипичным по сравнению с методом с более простыми формулами расчета стальных прокатных элементов, приведенными в нормативном документе *DIN 18800*. При анализе действия усилия $V_{z,pl}$ закругленные участки элемента игнорируются. При анализе действия момента $M_{t,pl}$ в тонкостенных сечениях используется более консервативное приближение (аппроксимация), тогда как в толстостенных (сплошных) сечениях используется точное решение, получаемое при помощи метода, разработанного Акессоном и Бэклундом (*B. Akesson & J. Bäcklund*). Следует также отметить, что во вращающейся расчетной системе, в которой анализируемые элементы вращаются вокруг своего стандартного состояния (по умолчанию), и, состоящей из прокатных (табличных) элементов, пластические усилия и моменты всегда должны быть преобразованы.

- Анализ пластических усилий с использованием реальной геометрии сечения (*AQUA – Full Version*)

Для тонкостенных сечений произвольной формы и материала нормальные (осевые) усилия и изгибающие моменты, возникающих на этапе пластических

деформаций, могут быть проанализированы с достаточной точностью. Анализ влияния на систему пластических сдвиговых усилий $V_{y,pl}$, $V_{z,pl}$ может быть произведен достаточно хорошо (пренебрегая влиянием центра сдвига на результат анализа). Метод, который в настоящее время использует модуль *AQUA* для достижения данной цели, основан на доведении (масштабировании) значений упругих напряжений до предела текучести, что в общем случае позволяет произвести, хоть и незначительную, но переоценку точных теоретических значений, как в случае с моментом $M_{t,pl}$.

Для толстостенных (сплошных) сечений произвольной формы и материала, рассчитанных при помощи метода граничных элементов *BEM* или метода конечных элементов *FEM*, нормальные (осевые) усилия и изгибающие моменты, возникающих на этапе пластических деформаций, могут быть проанализированы с достаточной точностью. Однако, при действии в расчетной системе кручения (это касается только общего случая) трудно четко различить не замкнутое по контуру сечение и замкнутое. При решении всех задач, связанных с учетом влияния сдвига на сплошные многоугольные сечения, учет общей суммы площадей приведет к возникновению значительно завышенных и неправдоподобных значений расчетных характеристик.

При помощи стандартного метода *BEM*, а также с помощью метода *FEM* в сочетании исключительно с командой *CTRL PLAS +16*, модуль *AQUA* будет использовать деформации в плоскости сдвига для анализа действия усилий $V_{y,pl}$ и $V_{z,pl}$ на систему, обеспечивая при этом до 20% запаса.

Если используется стандартный метод *FEM (PLAS 1)*, то модуль *AQUA* применяет масштабирование на основе упругого напряжения, возникающего при кручении и сдвиге в сечении, что позволяет частично переоценить значения как крутильных, так и сдвиговых напряжений (см. раздел 2.8.1). Очень часто возникает вопрос, как эти значения (в частности, при пластическом сдвиге) сравниваются со стандартными табличными значениями. В действительности каждый модуль использует несколько отличные друг от друга механизмы определения области, которая должна рассматриваться программой как

полностью пластичная и активная. Тем не менее, использование метода *PLAS 1* для задач, связанных с проектированием сооружений, является достаточно адекватным, надежным, численно точным и не дорогим. Если требуется произвести максимально точный анализ системы в плане механики пластичности, то может быть применен метод *PLAS 2*, однако, данный метод требует куда больше вычислительных ресурсов от ЭВМ и опыта от самого расчетчика (не рекомендуется для общего использования).

И наконец, применение метода *PLAS 0* для расчета стандартных стальных прокатных элементов (метод установлен по умолчанию в модуле *AQUA*) рекомендуется при решении задач, связанных с проектированием сооружений.

- Анализ расчетных значений при нелинейном взаимодействии с учетом реальной геометрии сечения (*AQB* – команда *NSTR*)

С помощью этого метода учитываются все предварительные (обязательные) условия, такие как согласованность свойств системы, критерии текучести и равновесия. Однако, анализ системы всегда осуществляется при действии на нее отдельной комбинации усилий/моментов. Учитывая данную особенность работы программы можно сказать, что предельное значение расчетной характеристики должно находиться итерационно (в несколько проходов).

2.11 Программные ограничения

Имеются следующие ограничения при создании расчетной модели в ПК *SOFiSTiK*:

Количество материалов	999
Материалы в составе поперечного сечения	31
Количество поперечных сечений	9999
Количество армированных (укрепленных) слоев	10
Количество вершин в многоугольнике	255

Количество плоскостей сдвига (среза), проходящих через поперечное сечение

255

3 ОПИСАНИЕ ВВОДНЫХ КОМАНД

Модуль *AQUA* позволяет рассчитать свойства поперечных сечений элементов любой формы и изготовленных из любого материала. Для расчета простых сечений и материалов вам не потребуется специальная лицензия, но для сечений, ввод в систему которых начинается с команды *SECT*, вам необходима лицензия на модуль *AQUA*.

Перед заданием сечения вы должны определиться с материалом, из которого оно будет изготовлено. Для идентификации система присваивает материалу абсолютно произвольный номер/индекс. Обратите внимание, что при отслеживании фаз/этапов возведения сооружения в модуле *AQBS* материалы, имеющие более высокий номер/индекс, будут добавлены в систему позже остальных.

Стандартное сечение (заводское, профиль) задается в системе только при помощи одной вводной команды. Все характеристики данного сечения будут рассчитаны программой автоматически, включая характеристики прочности на сдвиг и кручение. Максимальные значения составляющих для всех видов напряжений уже известны, однако, для подробного анализа различных участков сечения все же потребуется проведение дополнительных расчетов.

<i>SVAL</i>	Сечение без геометрии
<i>SREC</i>	Прямоугольные сечения, плиты, балки + <i>T-beam</i>
<i>SCIT</i>	Круглые и кольцевые сечения – Толщина стенки/Диаметр
<i>TUBE</i>	Трубчатое сечение
<i>PROF</i>	Прокатный элемент из металла
<i>CABL</i>	Кабельный (нити) элемент
<i>SECT</i>	Общее сечение (требуется лицензия к модулю <i>AQUA</i>)

При помощи модуля *AQUA* все характеристики уже заданных поперечных сечений могут быть изменены в любое время во время обработки/анализа расчетной системы, не влияя при этом на значения характеристик других заданных сечений. Однако, при работе в программе следует учесть следующее,

если внести какие-либо изменения в свойства материала, все существующие сечения удаляются либо требуют доработки. Распределение арматуры и расчетные напряжения также удаляются. В качестве альтернативы, возможен также полный перезапуск (удаление всей базы данных) расчетной системы – команда *CTRL REST*.

Задание пользовательских поперечных сечений всегда начинается с команды *SECT*, которая определяет номер поперечного сечения. Все последующие команды характеризуют (описывают) данное поперечное сечение, которое может состоять из нескольких частей (внешний периметр, внутренний периметр, схема расположения арматуры и т. д.). Ввод сечения в систему осуществляется либо при вводе следующей команды *SECT*, либо при помощи двух команд *END*.

3.1 Используемый язык программирования

Ввод всех нижеприведенных команд выполняется на языке программирования *CADINP* (см. общее руководство по ПК *SOFiSTiK: «Basics»*). Геометрическая и статическая системы уже должны быть сохранены в базе данных программы.

3.2 Используемые единицы измерения

Программа *SOFiSTiK* позволяет осуществлять ввод и вывод данных/результатов расчета в технических единицах измерения. Для этой цели предусмотрено несколько блоков единиц измерений, которые формируются в соответствии с используемыми нормативными документами/государственными стандартами, используемые при расчете/проектировании сооружения. Единицы измерения, установленные в программе по умолчанию, могут быть изменены для каждого проекта отдельно, используя предназначенную для этой операции

команду *PAGE*. Более подробную информацию об используемых единицах измерения и их блоках вы можете найти в общем руководстве по ПК *SOFiSTiK*, раздел «*Units/Используемые единицы измерения*».

Программа различает 3 категории единиц измерения:

mm **Фиксированные единицы.** Соответствуют рассматриваемой единице измерения.

[mm] **Явная единица.** Значения, которые вводятся по умолчанию в указанных единицах. Также возможно явное присвоение соответствующей единицы определенному значению (например, 2.5 [*m*]).

[mm]₁₀₁₁ **Неявная единица.** Неявные единицы относятся к категории семантических единиц и обозначаются соответствующим идентификационным номером (показан зеленым цветом). Допустимые категории, относящиеся к единице "длина", являются, например, геодезическая высота, длина и толщина сечения. Ед. измерения, устанавливаемые программой по умолчанию для каждой категории, определяются текущим активным (соответствует выбранным ранее нормам и правилам при проектировании) рядом единиц измерения. Этот ряд, как было сказано ранее, может быть изменен (команда *PAGE*). Указанная в квадратных скобках единица измерения, по умолчанию, соответствует ряду 5 (*Eurocodes, NORM UNIT 5*).

Для сечений в большинстве случаев используется единица [*mm*], для блока единиц 0, 3 и 4 используется [*m*], для блока единиц 1 используется [*cm*]. Для обозначения армирования в большинстве случаев используется единица [*cm*²], для блока единиц 6 и 7 используется [*mm*²].

Ниже приведены соответствия блоков единиц к соответствующей нормативной базе:

0 = Стандартные единицы изм. (м, кН, сек. с некоторыми

отклонениями)

- 1 = Немецкие нормы строительства (сечения в см, расчетная схема в м)
- 2 = Немецкие металлоконструкции (сечения в мм, см², дм², расчетная схема в м)
- 3 = Строительство мостов (также как в блоке 0, но внутренние усилия измеряются в МН, а не в кН)
- 4 = Механика грунтов (м, кН, сек)
- 5 = Проектирование строительных сооружений (сечения в мм, расчетная схема в м)
- 6 = Метрическая система (все измеряется в мм, нагрузки в кН)
- 7 = Машины и механизмы (все измеряется в мм, нагрузки в Н)
- 8 = Традиционная американская система (*AASHTO*)
- 9 = Традиционная американская система (*ACI/AISC*)

Блок единиц, определяемый исходя из используемого нормативного документа по умолчанию (*UNIT*), описан п.п. 3.6 данного руководства – команда *NORM*.

3.3 Ввод данных в расчетную систему

Команда	Параметры						
<i>CTRL</i>	<i>OPT</i>	<i>VAL</i>	<i>VAL2</i>				
<i>NORM</i>	<i>DC</i>	<i>NDC</i>	<i>COUN</i>	<i>CAT</i>	<i>ALT</i>	<i>WIND</i>	<i>SNOW</i>
	<i>SEIS</i>						
<i>MATE</i>	<i>NO</i>	<i>E</i>	<i>MUE</i>	<i>G</i>	<i>K</i>	<i>GAM</i>	<i>GAMA</i>
	<i>ALFA</i>	<i>E90</i>	<i>M90</i>	<i>OAL</i>	<i>OAF</i>	<i>SPM</i>	<i>FY</i>
	<i>FT</i>	<i>TYPE</i>	<i>TITL</i>				
<i>MAT</i>	<i>NO</i>	<i>E</i>	<i>MUE</i>	<i>G</i>	<i>K</i>	<i>GAM</i>	<i>GAMA</i>
	<i>ALFA</i>	<i>EY</i>	<i>MXY</i>	<i>OAL</i>	<i>OAF</i>	<i>SPM</i>	<i>TITL</i>
<i>MLAY</i>	<i>NO</i>	<i>T0</i>	<i>NR0</i>	<i>T1</i>	<i>NR1</i>	<i>T2</i>	<i>NR2</i>

Команда	Параметры						
<i>NMAT</i>	<i>T3</i>	<i>NR3</i>	<i>T4</i>	<i>NR4</i>	<i>T5</i>	<i>NR5</i>	<i>T6</i>
	<i>NR6</i>	<i>T7</i>	<i>NR7</i>	<i>T8</i>	<i>NR8</i>	<i>T9</i>	<i>NR9</i>
	<i>TITL</i>						
	<i>NO</i>	<i>TYPE</i>	<i>P1</i>	<i>P2</i>	<i>P3</i>	<i>P4</i>	<i>P5</i>
<i>BMAT</i>	<i>P6</i>	<i>P7</i>	<i>P8</i>	<i>P9</i>	<i>P10</i>	<i>P11</i>	<i>P12</i>
	<i>NO</i>	<i>C</i>	<i>CT</i>	<i>CRAC</i>	<i>YIEL</i>	<i>MUE</i>	<i>COH</i>
<i>HMAT</i>	<i>DIL</i>	<i>GAMB</i>	<i>TYPE</i>	<i>MREF</i>	<i>H</i>		
	<i>NO</i>	<i>TYPE</i>	<i>TEMP</i>	<i>KXX</i>	<i>KYY</i>	<i>KZZ</i>	<i>KXY</i>
<i>CONC</i>	<i>KXZ</i>	<i>KYZ</i>	<i>S</i>	<i>NSP</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
	<i>QMAX</i>	<i>TK</i>	<i>TITL</i>				
	<i>NO</i>	<i>TYPE</i>	<i>FCN</i>	<i>FC</i>	<i>FCT</i>	<i>FCTK</i>	<i>EC</i>
	<i>QC</i>	<i>GAM</i>	<i>ALFA</i>	<i>SCM</i>	<i>TYPR</i>	<i>FCR</i>	<i>ECR</i>
<i>STEE</i>	<i>FBD</i>	<i>FFAT</i>	<i>FCTD</i>	<i>FEQR</i>	<i>FEQT</i>	<i>GMOD</i>	<i>KMOD</i>
	<i>GC</i>	<i>GF</i>	<i>MUEC</i>	<i>TITL</i>			
	<i>NO</i>	<i>TYPE</i>	<i>CLAS</i>	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>ES</i>
	<i>QS</i>	<i>GAM</i>	<i>ALFA</i>	<i>SCM</i>	<i>EPSY</i>	<i>EPST</i>	<i>RELI</i>
<i>TIMB</i>	<i>REL2</i>	<i>R</i>	<i>K1</i>	<i>FDYN</i>	<i>FYC</i>	<i>FTC</i>	<i>TMAX</i>
	<i>GMOD</i>	<i>KMOD</i>	<i>QS</i>	<i>TITL</i>			
	<i>NO</i>	<i>TYPE</i>	<i>CLAS</i>	<i>EP</i>	<i>G</i>	<i>E90</i>	<i>NO</i>
	<i>QH90</i>	<i>GAM</i>	<i>ALFA</i>	<i>SCM</i>	<i>FM</i>	<i>FT0</i>	<i>QH90</i>
<i>MASO</i>	<i>FC0</i>	<i>FC90</i>	<i>FV</i>	<i>FVR</i>	<i>FVB</i>	<i>FM90</i>	<i>FC0</i>
	<i>OAF</i>	<i>KMOD</i>	<i>KMO1</i>	<i>KMO2</i>	<i>KMO3</i>	<i>KMO4</i>	<i>OAF</i>
	<i>TMAX</i>	<i>RHO</i>	<i>TITL</i>				<i>TMAX</i>
	<i>NO</i>	<i>STYP</i>	<i>SCLA</i>	<i>MCLA</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>MUE</i>
<i>SSLA</i>	<i>GAM</i>	<i>ALFA</i>	<i>SCM</i>	<i>E90</i>	<i>M90</i>	<i>OAL</i>	<i>OAF</i>
	<i>FCN</i>	<i>FC</i>	<i>FT</i>	<i>FV</i>	<i>FHS</i>	<i>FTB</i>	<i>TITL</i>
	<i>EPS</i>	<i>SIG</i>	<i>TYPE</i>	<i>TEMP</i>	<i>EPST</i>	<i>TS</i>	<i>MUET</i>
	<i>MNOC</i>	<i>FCTF</i>					

Команда	Параметры						
<i>MEXT</i>	<i>NO</i> <i>VAL9</i>	<i>EXP</i>	<i>TYPE</i>	<i>VAL</i>	<i>VAL1</i>	<i>VAL2</i>	
<i>BORE</i>	<i>NO</i> <i>ALF</i>	<i>X</i> <i>TITL</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>NX</i>	<i>NY</i>	<i>NZ</i>
<i>BLAY</i>	<i>S</i> <i>PMAL</i>	<i>MNO</i> <i>C</i>	<i>ES</i> <i>PHI</i>	<i>MUE</i>	<i>DES</i>	<i>VARI</i>	<i>PMAX</i>
<i>BBAX</i>	<i>S1</i> <i>C0</i> <i>CA2</i>	<i>S2</i> <i>TANR</i>	<i>K0</i> <i>TAND</i>	<i>K1</i> <i>KSIG</i>	<i>K2</i> <i>D0</i>	<i>K3</i> <i>D2</i>	<i>M0</i> <i>CA0</i>
<i>BBLA</i>	<i>S1</i> <i>P1</i> <i>CL2</i>	<i>S2</i> <i>P2</i> <i>CL3</i>	<i>K0</i> <i>P3</i> <i>SM0</i>	<i>K1</i> <i>PMA1</i> <i>SM2</i>	<i>K2</i> <i>PMA2</i>	<i>K3</i> <i>CL0</i>	<i>P0</i> <i>CL1</i>
<i>SVAL</i>	<i>NO</i> <i>IZ</i> <i>ZMIN</i> <i>VZPL</i>	<i>MNO</i> <i>IYZ</i> <i>ZMAX</i> <i>MTPL</i>	<i>A</i> <i>CM</i> <i>WT</i> <i>MYPL</i>	<i>AY</i> <i>YSC</i> <i>WVY</i> <i>MZPL</i>	<i>AZ</i> <i>ZSC</i> <i>WVZ</i> <i>BCYZ</i>	<i>IT</i> <i>YMIN</i> <i>NPL</i> <i>TITL</i>	<i>IY</i> <i>YMAX</i> <i>VYPL</i>
<i>SREC</i>	<i>NO</i> <i>SS</i> <i>DASO</i> <i>INCL</i> <i>BCYZ</i>	<i>H</i> <i>MNO</i> <i>DASU</i> <i>REF</i> <i>SPT</i>	<i>B</i> <i>MRF</i> <i>DASS</i> <i>YM</i> <i>BEFF</i>	<i>HO</i> <i>MRFL</i> <i>A</i> <i>ZM</i> <i>TITL</i>	<i>BO</i> <i>RTYP</i> <i>AMIN</i> <i>IT</i>	<i>SO</i> <i>ASO</i> <i>AMAX</i> <i>AY</i>	<i>SU</i> <i>ASU</i> <i>ASL</i> <i>AZ</i>
<i>SCIT</i>	<i>NO</i> <i>MRF</i> <i>ASL</i>	<i>D</i> <i>MRFL</i> <i>IT</i>	<i>T</i> <i>RTYP</i> <i>AY</i>	<i>SA</i> <i>ASA</i> <i>AZ</i>	<i>SI</i> <i>ASI</i> <i>TITL</i>	<i>MNO</i> <i>DAS</i>	<i>A</i>
<i>TUBE</i>	<i>NO</i>	<i>D</i>	<i>T</i>	<i>MNO</i>	<i>BC</i>	<i>TITL</i>	
<i>CABL</i>	<i>NO</i> <i>W</i>	<i>D</i> <i>KE</i>	<i>TYPE</i> <i>TITL</i>	<i>INL</i>	<i>MNO</i>	<i>F</i>	<i>K</i>
<i>SECT</i>	<i>NO</i> <i>BTYP</i>	<i>MNO</i> <i>BCY</i>	<i>MRF</i> <i>BCZ</i>	<i>ALPH</i> <i>KTZ</i>	<i>YM</i> <i>TITL</i>	<i>ZM</i>	<i>FSYM</i>
<i>-CS</i>	<i>NO</i>	<i>TITL</i>	<i>ATIL</i>				
<i>-SV</i>	<i>IT</i> <i>AZ</i> <i>FACG</i>	<i>AK</i> <i>AYZ</i> <i>AG</i>	<i>YSC</i> <i>LEVY</i>	<i>ZSC</i> <i>LEVZ</i>	<i>CM</i> <i>MNO</i>	<i>CMS</i> <i>DEFF</i>	<i>AY</i> <i>FACE</i>
<i>-POLY</i>	<i>TYPE</i> <i>EXP</i>	<i>MNO</i>	<i>YM</i> <i>REFP</i>	<i>ZM</i> <i>REFD</i>	<i>DY</i> <i>REFS</i>	<i>DZ</i>	<i>SMAX</i>

Команда	Параметры						
- - <i>VERT</i>	<i>NO</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>R</i>	<i>PHI</i>	<i>TYPE</i>	<i>EXP</i>
		<i>REFP</i>	<i>REFD</i>	<i>REFS</i>			
- <i>CIRC</i>	<i>NO</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>R</i>	<i>MNO</i>	<i>EXP</i>	
	<i>REFP</i>	<i>REFD</i>	<i>REFS</i>	<i>REFR</i>			
- <i>NEFF</i>	<i>TYPE</i>	<i>YMIN</i>	<i>ZMIN</i>	<i>YMAX</i>	<i>ZMAX</i>	<i>MNO</i>	<i>WIDT</i>
	<i>NO</i>	<i>SMIN</i>	<i>SMAX</i>				
	<i>REFI</i>	<i>RFDI</i>	<i>RFSI</i>	<i>REFA</i>	<i>RFDA</i>	<i>RFSA</i>	
- <i>CUT</i>	<i>NO</i>	<i>YB</i>	<i>ZB</i>	<i>YE</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>MS</i>
	<i>WTM</i>	<i>WTD</i>		<i>MNO</i>	<i>MRF</i>	<i>LAY</i>	<i>ASUP</i>
	<i>OUT</i>	<i>TYPE</i>	<i>VYFK</i>	<i>VZFK</i>		<i>INCL</i>	<i>BMAX</i>
	<i>BRED</i>	<i>BCT</i>	<i>MUE</i>	<i>SXE</i>	<i>TANA</i>		<i>REFA</i>
	<i>RFDA</i>	<i>RFSA</i>	<i>REFE</i>	<i>RFDE</i>	<i>REFS</i>		
- <i>PANE</i>	<i>NO</i>	<i>YB</i>	<i>ZB</i>	<i>YE</i>	<i>ZE</i>	<i>T</i>	<i>MNO</i>
		<i>REFA</i>	<i>RFDA</i>	<i>RFSA</i>	<i>REFE</i>	<i>RFDE</i>	<i>RFSE</i>
	<i>R</i>	<i>PHI</i>		<i>OUT</i>	<i>FIXB</i>	<i>FIXE</i>	<i>TYPE</i>
		<i>AS</i>	<i>ASMA</i>	<i>LAY</i>	<i>MRF</i>	<i>TORS</i>	<i>DAS</i>
	<i>A</i>						
- <i>PLAT</i>	<i>NO</i>	<i>YB</i>	<i>ZB</i>	<i>YE</i>	<i>ZE</i>	<i>T</i>	<i>MNO</i>
		<i>REFA</i>	<i>RFDA</i>	<i>RFSA</i>	<i>REFE</i>	<i>RFDE</i>	<i>RFSE</i>
	<i>R</i>	<i>PHI</i>		<i>OUT</i>	<i>FIXB</i>	<i>FIXE</i>	<i>TYPE</i>
- <i>WELD</i>	<i>NO</i>	<i>YB</i>	<i>ZB</i>	<i>YE</i>	<i>ZE</i>	<i>T</i>	<i>MNO</i>
		<i>REFA</i>	<i>RFDA</i>	<i>RFSA</i>	<i>REFE</i>	<i>RFDE</i>	<i>RFSE</i>
- <i>PROF</i>	<i>NO</i>	<i>TYPE</i>	<i>Z1</i>	<i>Z2</i>	<i>Z3</i>	<i>MNO</i>	<i>ALPH</i>
	<i>YM</i>	<i>ZM</i>		<i>REFP</i>	<i>REFD</i>	<i>REFS</i>	<i>REFR</i>
	<i>DTYP</i>	<i>SYM</i>	<i>REF</i>	<i>MREF</i>		<i>VD</i>	<i>VB</i>
	<i>VS</i>	<i>VT</i>	<i>VR1</i>	<i>VR2</i>	<i>VB2</i>	<i>VT2</i>	
	<i>CW</i>	<i>BCYZ</i>	<i>WU1</i>	<i>WU2</i>	<i>WU3</i>		
- <i>SPT</i>	<i>NO</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>WTY</i>	<i>WTZ</i>	<i>WVY</i>	<i>WVZ</i>
	<i>SIGY</i>	<i>TEFF</i>		<i>CDYN</i>	<i>SIGC</i>	<i>TAUC</i>	<i>MNO</i>
	<i>FIX</i>	<i>REFP</i>	<i>REFD</i>	<i>REFS</i>			
- <i>SFLA</i>	<i>NO</i>	<i>U</i>	<i>F</i>	<i>S</i>	<i>SH</i>	<i>FP</i>	<i>TYPE</i>
	<i>LEV</i>	<i>TITL</i>					
- <i>WPAR</i>	<i>CS</i>	<i>KR</i>	<i>ICE</i>	<i>TRAF</i>	<i>YMIN</i>	<i>YMAX</i>	<i>ZMIN</i>
	<i>ZMAX</i>	<i>YREF</i>	<i>ZREF</i>				
- <i>WIND</i>	<i>ALPH</i>	<i>CWY</i>	<i>CWZ</i>	<i>CWT</i>	<i>REF</i>	<i>CHYD</i>	<i>CLAT</i>
	<i>S</i>	<i>AG</i>	<i>VR0</i>	<i>V0</i>		<i>VR19</i>	<i>V19</i>

Команда	Параметры						
- <i>RF</i>	<i>NO</i> <i>TORS</i> <i>REFD</i>	<i>Y</i> <i>D</i> <i>REFS</i>	<i>Z</i>	<i>AS</i> <i>AR</i>	<i>ASMA</i> <i>SIG</i>	<i>LAY</i> <i>TEMP</i>	<i>MRF</i> <i>REFP</i>
- <i>LRF</i>	<i>NO</i> <i>LAY</i> <i>REFA</i> <i>R</i>	<i>YB</i> <i>MRF</i> <i>RFDA</i> <i>PHI</i>	<i>ZB</i> <i>TORS</i> <i>RFSA</i>	<i>YE</i> <i>D</i> <i>REFE</i>	<i>ZE</i> <i>A</i> <i>RFDE</i>	<i>AS</i> <i>DIST</i> <i>RFSE</i>	<i>ASMA</i> <i>AR</i>
- <i>CRF</i>	<i>NO</i> <i>LAY</i> <i>REFP</i>	<i>Y</i> <i>MRF</i> <i>REFD</i>	<i>Z</i> <i>TORS</i> <i>REFS</i>	<i>R</i> <i>D</i> <i>REFR</i>	<i>PHI</i> <i>A</i>	<i>AS</i> <i>DIST</i>	<i>ASMA</i> <i>AR</i>
- <i>CURF</i>	<i>H</i> <i>TORS</i>	<i>EXP</i> <i>D</i>	<i>AS</i> <i>A</i>	<i>ASMA</i> <i>DIST</i>	<i>LAY</i> <i>AR</i>	<i>MRF</i> <i>CENT</i>	
<i>TVAR</i> <i>INTE</i>	<i>NAME</i> <i>NO</i> <i>ICS`9</i>	<i>VAL</i> <i>NS0</i>	<i>SCOP</i> <i>NS1</i>	<i>CMNT</i> <i>S</i>	<i>NREF</i>	<i>ICS</i>	
<i>IMPO</i> <i>EXPO</i>	<i>MAT</i> <i>MAT</i>	<i>SECT</i> <i>SECT</i>	<i>FROM</i> <i>TO</i>	<i>PASS</i>			
<i>ECHO</i>	<i>OPT</i>	<i>VAL</i>	<i>VAL2</i>				

Команды *HEAD*, *END* и *PAGE* описаны в общем руководстве ПК *SOFiSTiK*: «*Basics/Основы*».

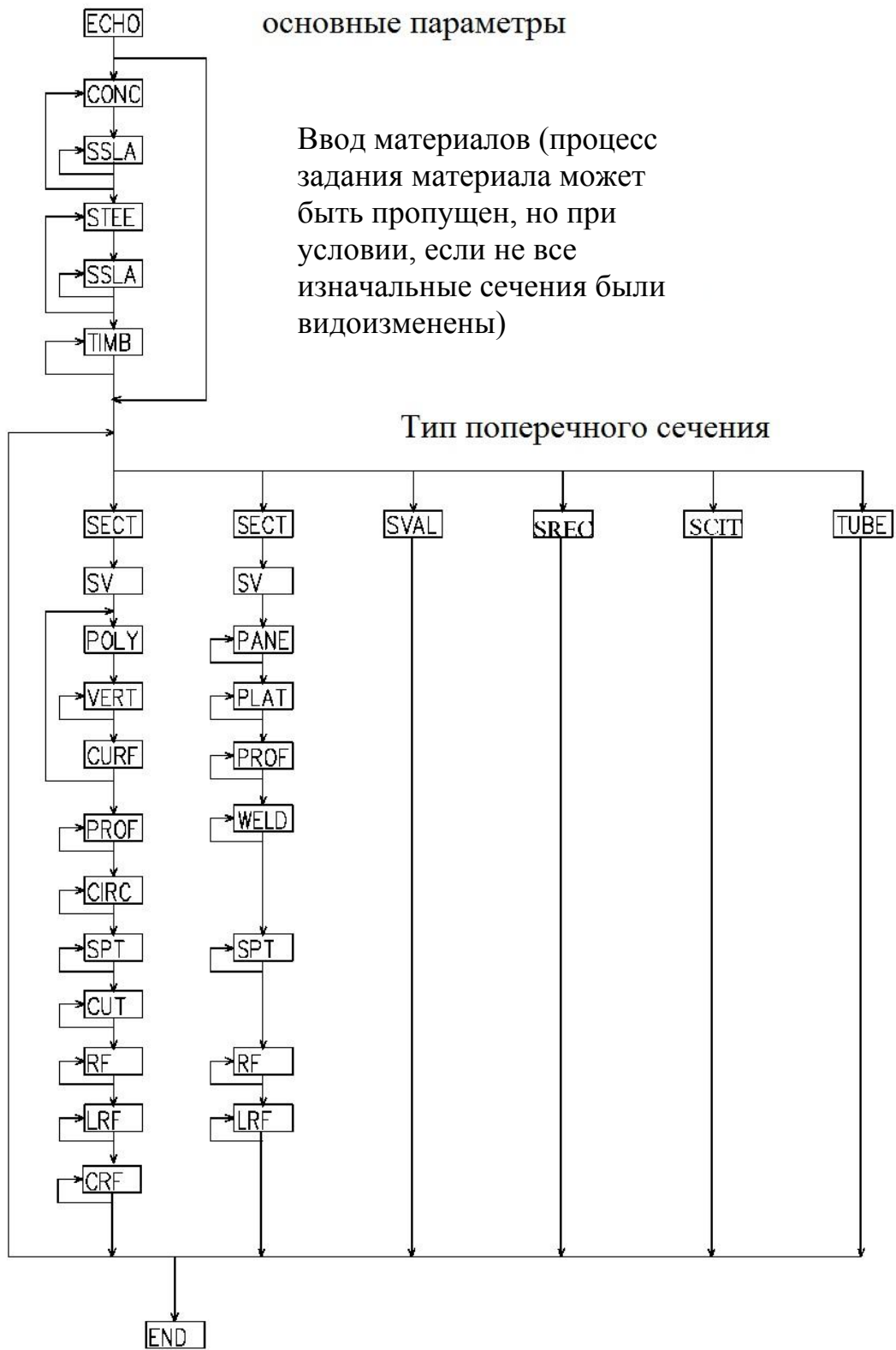


Рис. 3.1 – Блок-схема основных параметров *AQUA*

3.4 CTRL – Управление процессом анализа системы в AQUA

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>PT</i>	<p>Используемые функции команды:</p> <p><i>REST</i> Перезапуск системы (используется для удаления базы данных при перезапуске расчетной системы)</p> <p><i>FACE</i> Главный вид сечения</p> <p><i>POS</i> = положительная сторона плоскости сечения</p> <p><i>NEG</i> = отрицательная сторона плоскости сечения или численное отображение</p> <p><i>RFCS</i> Минимальное армирование, необходимое для расчета теоретических/истинных значений характеристик поперечного сечения</p> <p><i>HMIN</i> Максимальная длина граней многоугольника</p> <p><i>HDIV</i> Масштабирование плотности сетки при использовании метода <i>FEM</i> / максимальный размер элемента при использовании метода <i>BEM</i></p> <p><i>SDIV</i> Относительный размер элемента при использовании метода <i>BEM</i></p> <p><i>SINT</i> Специальная функция для использования <i>FEM/BEM</i></p> <p><i>HTOL</i> Допуск минимального участка перехода при закруглении в элементе</p>	<i>LIT</i>	<i>FULL</i>

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
	<p><i>STYP</i> Метод расчета влияния сдвига для сплошных/массивных сечений</p> <p><i>PLAS</i> Метод расчета влияния пластических деформаций при сдвиге для сплошных/массивных сечений, построенных при помощи конечных элементов</p> <p><i>SCUT</i> Количество стандартных плоскостей сдвига/среза – плоскостей действия касательных напряжений</p> <p><i>FIXL</i> Максимальное значение коэффициента, необходимого для определения шага изменения толщины панели, находящейся в состоянии потери устойчивости</p> <p><i>REFD</i> Ввод привязки системы/ориентация в пространстве</p>		
<p><i>AL</i></p> <p><i>VAL2</i></p>	<p>Значение параметра/функции</p> <p>Дополнительное значение параметра/функции</p>	<p>-</p> <p>-</p>	<p>*</p> <p>*</p>

Параметры команды *CTRL* могут быть введены в любом месте программного кода расчетной системы. Однако, если значения этих параметров предназначены для разных сечений, то их необходимо ввести перед теми сечениями, которым они предназначены для последующих расчетов. При использовании команды *CTRL REST 3* все заданные ранее характеристики будут

использованы программой для повторного анализа всех сечений, введенных в расчетную систему.

Команда *CTRL REST* ответственна за то, как модуль *AQUA* должен поступить с уже полученными результатами анализа/расчета, хранящимися в базе данных программы. По умолчанию модуль *AQUA* будет удалять: 1) все данные при условии, если в системе будут заданы материалы; 2) только данные, касающиеся минимального армирования, предельных напряжений и жесткости балки при условии, если в системе заданы только сечения. Применение данной команды, в большинстве случаев, является наилучшим вариантом для того, чтобы избежать непредсказуемых результатов. Хотя в некоторых случаях, пользователю желательно бы продолжить обработку этих результатов. Необходимость в продолжение анализа/расчета системы может возникнуть только в том случае, если введенные в не слои и материалы с соответствующими порядковыми номерами не были изменены для отдельных сечений.

- 0 удаляются старые значения в базе данных (по умолчанию)
- 1 старые значения в базе данных сохраняются
- 2 сохраняются все значения, даже если изменен материал, подразумевается возможное проведение повторного анализа/расчета сечений. Команда *CTRL REST 2 nn* отвечает за повторный анализ сечения *nn*
- 3 повторный анализ всех сечений расчетной системы

Команда *CTRL FACE* позволяет задать способ отображения сечения. Физическая ориентация в пространстве определяется только положением локальной системы координат балочного элемента. Однако, при помощи некоторых параметров пользователь может отобразить расчетные характеристики, полученные в ходе анализа, в пределах плоскости сечения: параметр *POS* и все положительные значения характеристик определяют вид положительной стороны плоскости сечения (т.е. в обратном направлении балочного элемента или оси); *NEG* и все отрицательные значения расчетных характеристик определяют вид

отрицательной стороны плоскости сечения (то есть вдоль направления балки или оси):

POS слева от оси *y*, ниже оси *z* (по умолчанию)

NEG справа от оси *y*, ниже оси *z*

1, 3 поворот на 0 или 180 градусов относительно горизонтальной оси *y*

2, 4 поворот на 90 или 270 градусов относительно вертикальной оси *y*

> 4 Поворот на величину противоположную значению параметра *VAL*, установленному по умолчанию

Команда *CTRL RFCS* позволяет контролировать учет минимального армирования при расчете значений характеристик поперечного сечения:

0 не учитывать

1 учитывается в композитных сечениях (по умолчанию)

2 учитывается для всех видов сечений (также для круглых и кольцевых сечений (*SCIT*), но не для прямоугольных сечений (*SREC*))

3 учитывается влияние собственного веса (в этом случае следует уменьшить вес бетона)

+4 не назначать армирование для участка сечения

Параметр *HMIN* определяет максимально допустимую длину для линейных или закругленных граней многоугольника (по умолчанию: без ограничений).

Параметр *HTOL* определяет максимально допустимую длину участка (погрешность/допуск) перехода из закругленной грани (дуги окружности) многоугольного сечения в прямую грань. Это применимо к закругленным местам в конструкции и аркам (по умолчанию: 0.0035).

Существует два альтернативных способа задания переходного участка:

- Коэффициент *HTOL* [-] - переходный участок задается так, чтобы все закругленные элементы использовали те же угловые координаты (угловое разрешение), которое бы лучше всего подходило для визуализации

элемента. Однако, при небольшом радиусе, а именно меньше 50 мм, угол сегментов окружности будет увеличен до 6 раз.

- ***HTOL* задание определенных размеров переходного участка [мм или м]** – в систему вводятся необходимые размеры переходного участка.

В обоих случаях системой не принимаются значения углов сегментов окружности менее 1 градуса или больше 30 градусов.

Параметр *HDIV* определяет максимальную длину граничного элемента – метод граничных элементов (*BEM*). При использовании метода конечных элементов (*FEM*), параметр *HDIV* определяет плотность конечно-элементной сетки.

Существует два альтернативных способа применения данного параметра для масштабирования конечно-элементной сетки:

- **Коэффициент *HDIV* [-]** – например, значение коэффициента 0.5 [-] означает, что каждый элемент сетки должен быть уменьшен до 50% от ее первоначального размера, полученного в ходе анализа системы в модуле *AQUA*. Такой же эффект может быть достигнут и при вводе в систему 50 [%]. Пользователь также может использовать значение коэффициента, превышающее 1.0 [-] или 100 [%].
- ***HDIV* задание определенных размеров сетки [мм или м]** - в систему вводятся необходимые размеры конечно-элементной сетки. В этом случае модуль *AQUA* определяет отношение введенных размеров к внутренне рассчитанным «размерам области элемента» и применяет полученный коэффициент к данной области.

Поскольку размер ячейки не может быть изменен без участия самого пользователя, в модуль *AQUA* встроены фиксированные допустимые внутренние пределы изменения в диапазоне [0.1 ... 5.0] или [10% ... 500%]. Любое значение, введенное за пределы этой области, запускает в программе процесс перестройки конечно-элементной сетки до ближайшего предела с последующим предупреждением.

Параметр *SDIV* определяет требуемую относительную длину элемента согласно методу граничных элементов *BEM*. При использовании метода конечных элементов для данного параметра должно быть установлено значение 0 по умолчанию, а если это не так, то введенное значение будет проигнорировано программой (см. п.п. 2.8.2).

- | | |
|---|---|
| 0 | нет явного разбиения элемента |
| 1 | максимум на 1/2 |
| 2 | максимум на 1/4 |
| 3 | максимум на 1/8 |
| 4 | максимум на 1/16 |
| 5 | максимум на 1/32 (по умолчанию <i>BEM</i>) |

Расстояние привязки (всегда задается в м) для выявления и последующего соединения частей поперечного сечения может быть введено в систему как дополнительный параметр *VAL2*. Значение параметра *SDIV 4 0.001* определяет 1 мм, как показатель привязки.

Более подробно параметры *STYP* и *SCUT* описаны в п.п. 2.8 данного руководства.

Параметр *STYP* отвечает за процесс анализа сдвиговых напряжений в сплошных/массивных сечениях:

- | | |
|------------------|--|
| <i>STYP FEM</i> | Метод конечных элементов – для определения всех свойств поперечного сечения, связанных с воздействием сдвига (по умолчанию) |
| <i>STYP FEMX</i> | Используется метод конечных элементов, как и в предыдущем случае, но с использованием вторичной базы данных, в подразделе (подпапке) которой содержится информация по конечно-элементной сетке сечения |
| <i>STYP BEM</i> | Метод граничных элементов с учетом дополнительных функций, устанавливаемых по умолчанию: 1 для бетона; 3 в остальных случаях |

<i>STYP BEM 1</i>	Метод граничных элементов только с учетом значения параметра I_t и координат расположения центра сдвига y_{sc} и z_{sc} (устанавливается для бетона по умолчанию)
<i>STYP BEM 2</i>	Метод граничных элементов при действии кручения и Метод Сил при действии сдвига с использованием плоскости сдвига/среза
<i>STYP BEM 3</i>	Метод граничных элементов при действии кручения. Также определяется область/плоскость сдвиговых деформаций
<i>STYP FORC</i>	Метод Сил

Примечание

По умолчанию в версии ПК *SOFiSTiK 2014* может быть установлена команда *CTRL STYP BEM*. Однако, для пользовательских прямоугольных, тавровых (*T-Beam*) и круглых бетонных сечений значения параметров A_y и A_z , при необходимости, должны быть заданы пользователем собственноручно и равны 0.0.

Параметр *PLAS* определяет метод расчета пластических деформаций при сдвиге для *FE* (конечно-элементных) массивных/сплошных сечений:

- 0 учитываются все пластические характеристики, взятые из сортамента стандартных/прокатных сечений
 - 1 рассчитываются свойства пластического сдвига с использованием конечно-элементного метода масштабирования потока упругих сдвиговых напряжений (по умолчанию)
 - 2 рассчитываются свойства пластического сдвига с использованием конечно-элементного метода совместно с нелинейным приращением перемещений
- +1*16 заменить текущие методы расчета пластических усилий $V_{y, pl}$ и $V_{z, pl}$ на метод, в основе которого заложено масштабирование областей упругих деформаций при сдвиге

Параметры команды *CTRL* существенно влияют на результирующую картину, поэтому, каждому пользователю необходимо в обязательном порядке ознакомиться с каждым параметром в отдельности. Для начала рекомендуется ознакомиться с разделами 2.8 и 2.10 данного руководства, в которых подробно описаны данные параметры и их применение при анализе расчетной системы.

Параметр *SINT* определяет метод интегрирования уравнений при использовании конечно-элементного метода *FEM* расчета системы:

- 1 интегрируется только центральная часть элемента (применяется при достаточно плотной конечно-элементной сетке)
- 2 интегрируются только узлы элемента
- 3 интегрирование по методу Лобатто (Гауса-Лобатто) как центральной части элемента, так и его узлов (по умолчанию)

Тонкостенные сечения всегда рассчитываются при помощи метода конечных элементов *FEM*. При расчете толстостенных/сплошных сечений с использованием более сложных методов в системе могут возникать большие по значению напряжения – данный случай является исключительным. Чтобы исключить влияние этих значений при расчете, можно воспользоваться параметром *STYP 1*, установив при этом, что для всех плоскостей сдвига/среза согласно методу сил будут использоваться упрощенные значения. Если в систему введены параметры *STYP 2* или *STYP 3*, то в этом случае будут использоваться интегральные средние значения, а во всех остальных точках концентрации напряжений будут приложены расчетные значения.

Параметр *SCUT* контролирует процесс создания двух стандартных плоскостей сдвига/среза параллельно оси координат и стандартных концентраторов напряжений:

- +0 плоскости сдвига/среза не создаются
- +1 создание главной плоскости сдвига/среза, проходящей через центр тяжести сечения
- +2 Создание обеих плоскостей сдвига/среза, проходящих через центр

тяжести сечения

- +8 вместо расчетного/рабочего сечения оценивается влияние сдвига на сечение брутто в соответствии с методом сил

Контролирование концентраторов напряжений ($VAL = VAL + 16*nn$):

- +0 концентраторы напряжений не создаются
- +1 угловые точки с максимальным расстоянием друг от друга (точки 1:4)
- +2 точка пересечения главной оси с сечением (точки 5:8)
- +4 точка пересечения главной оси с выпуклой оболочкой множества точек (пункты 5:8)
- +8 пересечение с исходной системой координат вместо главных осей
- +16 используется только ордината z (одноосевой изгиб)

Несмотря на то, что ввод в систему привязок лучше всего осуществлять с учетом относительных смещений (по умолчанию: *CTRL REFD 1*), то при экспорте модели с фактическими абсолютными координатами, введя команду *CTRL REFD 0*, пользователь может собственноручно задать значения абсолютных координат. Учитывая данную особенность, пользователь также может привязаться к элементу, введенному в систему позже, однако, система будет учитывать все значения координат, которые были введены в ее состав ранее. Идентификаторы привязок должны быть уникальными для каждого типа элементов. Однако, для всех типов элементов могут использоваться одни и те же идентификаторы, но при условии, если анализируемые сечения, исходя из заданной последовательности команд, вводятся в систему только на языке программирования *CADINP*. Для тестирования системы при помощи команды *CTRL REFD 2 + xx* алгоритм ввода привязок может быть изменен на старую чисто последовательную схему.

3.5 Материалы

ПК *SOFiSTiK* включает в себя большое количество свойств и характеристик различных материалов. Каждый материал, используемый при создании расчетной системы, имеет свой уникальный номер. Значения характеристик материала, установленных в системе по умолчанию, и допуски к его использованию зависят от выбранных норм и стандартов, которые необходимо соблюдать при проектировании сооружения – *NORM*. В некоторых случаях значения характеристик материала могут быть изменены путем выбора тех или иных государственных норм и стандартов – знак принадлежности страны (*SNIP*, *AS*, *BS*, *DIN*, *US* и т.д.). При необходимости все значения характеристик могут быть изменены пользователем собственноручно.

Основные характеристики вводятся через команды:

<i>NORM</i>	Выбор соответствующих стандартов проектирования
<i>MATE</i>	Общее обозначение материала, включая прочность
<i>CONC</i>	Бетон
<i>STEE</i>	Сталь и другие металлы
<i>TIMB</i>	Древесина/пиломатериалы и другие волокнистые материалы
<i>MASO</i>	Кирпич/кирпичная кладка
<i>MLAY</i>	Слоистый композитный материал, состоящий из плоских <i>QUAD</i> элементов

Приведенные ниже команды являются взаимоисключающими, но могут быть усилены при помощи других команд:

<i>BMAT</i>	Упругое основание
<i>NMAT</i>	Нелинейные свойства материала для <i>MAT/MATE</i> (модули <i>ASE/TALPA</i> для элементов <i>QUAD</i> и <i>BRIC</i>)
<i>HMAT</i>	Материал, используемый для анализа системы в модуле <i>HYDRA</i> (температурный и фильтрационный анализ)
<i>SSLA</i>	Испытание материала на одноосное растяжение и

Ввод материала в расчетную систему возможен в любой момент работы над ней. Однако, очевидно, что не все характеристики материала используются при том или ином анализе расчетной схемы, а также при создании самой системы. Каждый материал, исходя из его классификации, имеет свое стандартизированное/нормированное название, которое может быть расширено пользователем. Если пользователь хочет полностью заменить нормированное обозначение материала, он должен ввести его в код системы, начав с восклицательного знака (например, '!мой собственный текст') или взять введенный текст в кавычки повторно (например, "'мой собственный текст'").

Свойства материалов следует отличать друг от друга в соответствии с тем, насколько значения данных свойств приближены к реальной картине работы системы (например, при динамическом расчете) или же, эти свойства имеют минимальное или максимальное предельное значение, которое следует умножить на коэффициент запаса при расчете предельной несущей способности. Ранее значения коэффициентов запаса назначались более или менее случайным образом, иногда по нагрузке, а иногда и по материалу. Сейчас же, исходя из последних редакций Еврокода, необходимо более четкое разделение коэффициентов запаса по нагрузке и коэффициентов запаса по материалу. Однако, поскольку коэффициенты запаса по материалу по-прежнему зависят от характера нагрузки или типа сооружения, пользователь не может собственноручно задать все коэффициенты запаса по материалу.

Таким образом, при расчете системы ПК *SOFiSTiK* опирается на:

- Значения свойств/характеристик материала и коэффициенты запаса, исходя из выбранных норм проектирования
- Средние или расчетные значения характеристик и коэффициенты запаса при наличии нелинейных эксплуатационных свойств и анализе деформаций

Если в некоторых нормативных документах (*DIN 18800*, *DIN 1045-1*) подразумевается применение дополнительных коэффициентов запаса для средних значений, то их можно получить путем соотношения возникающих напряжений и деформаций при помощи команды *SSLA*. Таким образом, коэффициент запаса по материалу будет использоваться программой только при достижении пластических усилий – расчет в модуле *AQUA*.

ПРИМЕЧАНИЕ: Последующие страницы описывают все особенности работы в программе только для модуля *AQUA*, для других модулей (*SOFiMSHB*) возможны некоторые отклонения от нормальной работы по причине того, что относительно старые версии программы отсутствуют или изменены некоторые элементы.

ПРИМЕЧАНИЕ: Советы по свойствам нестандартных материалов можно найти на сайте *www.azom.com* (материалы от *A* до *Z*).

3.6 NORM – Нормы проектирования и расчета сооружений

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>DC</i>	Нормы проектирования <i>EN</i> Еврокод <i>DIN</i> Немецкие нормы <i>OEN</i> Австрийские -//- <i>SIA</i> Швейцарские -//- <i>AS</i> Австралийские -//- <i>BS</i> Британские -//- <i>IS</i> Индийские -//- <i>US</i> США -//- <i>GB</i> Китайские строительные -//- <i>NF</i> Французские -//- <i>UNI</i> Итальянские -//- <i>UNE</i> Испанские -//- <i>SS</i> Шведские -//- <i>DS</i> Датские -//- <i>NS</i> Норвежские -//- <i>SNIP</i> Российские -//- <i>NZS</i> Новозеландские -//- <i>SFS</i> Финские -//- <i>NEN</i> Голландские -//- <i>NBN</i> Бельгийские -//- <i>NBR</i> Бразильские -//- <i>ZA</i> Южно-Африканские -//-	<i>LIT</i>	<i>EN</i>
<i>NDC</i>	Обозначение конкретного нормативного документа	<i>Lit16</i>	-
<i>COUN</i>	Код страны, используемый <i>EN</i> – «boxed»	-	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>CAT</i>	<i>values»</i> Категория или класс	<i>Lit4</i>	-/!
<i>LON</i>	Географическая долгота	°	0
<i>LAT</i>	Географическая широта	°	45
<i>G</i>	Ускорение свободного падения	м/сек ²	*
<i>ALT</i>	Высота над уровнем моря	м	0.0
<i>WIND</i>	Ветровая зона	<i>Lit4</i>	*
<i>SNOW</i>	Снежная зона	<i>Lit4</i>	*
<i>SEIS</i>	Сейсмическая зона	<i>Lit4</i>	*
<i>WCAT</i>	Тип местности для учета ветра	<i>Lit4</i>	*
<i>UNIT</i>	Выбор блока единиц измерения	-	*
<i>LANG</i>	Выбор языка отображения результатов по умолчанию	-	*

Большинство расчетных характеристик/параметров материалов, значения которых устанавливаются программой по умолчанию, определяются в соответствии с выбранными нормативными документами, государственными стандартами (код страны) и всеми другими параметрами, включенными в состав данной команды (*NORM*). Поэтому, перед началом работы в программе, пользователю предлагается указать используемые стандарты/нормы проектирования собственноручно.

Изменение используемого государственного стандарта или нормативной документации после ввода в расчетную схему воздействий (*action*) или случаев загрузки (*load case*) или редактирование *INI*-файла для ввода в систему "недостающих" материалов не соответствует положениям ПК *SOFiSTiK*, которые описывают надлежащее/правильное использование расчетного комплекса. Старайтесь заранее ввести в систему все необходимые исходные данные.

Для расчета (например, бетона/стали) можно, но только временно, изменить используемую нормативную документацию – команда *NORM*, если при этом параметры введенных в систему воздействий (*action*) остаются неизменными. Поскольку использование данной возможности влечет за собой определенные риски, пользователю необходимо проявить особую внимательность и осторожность.

При работе в данном программном комплексе для ввода некоторых характеристик необходимо обладать навыками программирования. Несмотря на это многие из этих характеристик, устанавливаемых программой по умолчанию, расположены в так называемых *INI*-файлах, которые в свою очередь находятся в каталоге/хранилище *SOFiSTiK*. Имя соответствующего *INI*-файла определяется исходя из используемых нормативных документов – *DC_NDC.INI* (см. таблицу команды *NORM*).

Значения некоторых свойств (например, в Еврокоде) зависят от государства, а точнее от переходного значения («*boxed values*»), соответствующее определенному государственному стандарту, по которому проектируется сооружение. В случае, когда переходные значения неизвестны, они определяются исходя из соответствующих *INI*-файлов, согласно нормативным документам *EN 1992-2004* и *EN 1993-2005*, а также кода страны. Так, например, отклонения от британских стандартов 8110, 5400, 5950 при использовании их в Гонконге (*HK*) также контролируются при помощи кодов страны. Примеры кода страны:

<i>00</i>	Общий стандарт (Еврокод – <i>EN</i>)
<i>HK / 852</i>	Гонконг

ПРИМЕЧАНИЕ: Изначально Еврокоды были конвертированы (доработаны) Европейским комитетом по стандартизации (фр. *Comité Européen de Normalisation, CEN*) в виде 62 Европейских стандартов (*European Prestandards – ENV*). Например, Еврокод 5 «Проектирование деревянных конструкций. Общие правила и правила проектирования зданий» (год выпуска 1993) → Европейский

стандарт *ENV 1995-1-1* (год выпуска 1995). Большинство из них были опубликованы в период с 1992 по 1998 год, но из-за трудностей в согласовании всех используемых методов расчета в Еврокоды включили переходные значения – «*boxed values*», которые позволяли странам-членам Европейского Союза выбрать другие значения расчетных характеристик для использования их в пределах своего государства.

Переходные значения «*boxed values*» могут быть изменены вручную при помощи команды *TVAR*.

Некоторые стандарты имеют классы или категории, которые вы можете или должны указывать при помощи параметра *CAT*. Возможные пункты (категории или классы) указаны в *INI*-файле. Для расчета или анализа системы по старым нормам (до конвертации в *ENV*), которые не представлены в *INI*-файле, вы можете воспользоваться параметром *CAT* и указать любой нормативный документ или государственный стандарт.

В случае последующей конвертации или дополнении государственных стандартов, введенные классы или категории должны быть проверены и адаптированы при необходимости.

Параметры команды *NORM*, которые позволяют задать в системе географическую широту, высоту над уровнем моря, ветровой/снеговой район или район сейсмической активности, описаны в руководствах по модулям, в которых они используются. Пользователю не следует полагать, что если он введет в систему все эти параметры, то все нормативные требования будут выполняться автоматически. Возможные значения данных параметров, а также значения, установленные системой по умолчанию, располагаются в соответствующем *INI*-файле. В случае изменения параметров команды *NORM* (*LON*, *LAT*, *G*, *ALT*, *WIND*, *SNOW*, *SEIS*, *WCAT*) результирующие значения, полученные в процессе расчета системы, должны быть проверены в соответствующих модулях. Например, в некоторых нормативных документах коэффициенты сочетаний кратковременных нагрузок (нагрузка от снега/ветра) зависят от высоты расположения

проектируемого сооружения над уровнем моря (*ALT*). В случае изменения параметра *ALT* (высота над уровнем моря) коэффициенты сочетания нагрузок должны быть адаптированы или изменены пользователем собственноручно, если это необходимо.

Если пользователь хочет полностью исключить влияние данного параметра, то ему необходимо воспользоваться командой «*NONE*». Собственный вес, введенный в систему в составе случая загрузки *LC*, всегда учитывается программой в соответствии с выбранными государственными стандартами/нормативной базой. Пользовательское значение *G* (собственный вес) вводится в систему только в тех случаях, когда необходимо учесть влияние отдельно взятого элемента – локальное приложение нагрузки.

Параметры *UNIT* и *LANG* анализируются только в модуле *AQUA* или *TEMPLATE*. При помощи параметра *UNIT* вы можете установить ввод и вывод данных в тех единицах измерения, в которых вам необходимо. Значение данного параметра, устанавливаемого системой по умолчанию, указано в *INI*-файле. Настройки системы, установленные при помощи команды *PAGE*, будут активны только в текущем модуле (программный код).

Приведенные ниже нормы проектирования доступны как в *INI*-файлах, так и в виде программного кода. Знаки *A* и *B* указывают, был ли этот нормативный документ задействован при анализе системы в модулях *AQB* и *BEMESS* соответственно. Для получения более подробной информации, особенно о том, какие положения, изложенные в нормативном документе, были задействованы при создании расчетной системы, ознакомьтесь с руководствами и *HTM*-файлами соответствующих расчетных модулей. В большинстве случаев в систему можно ввести некоторые поправки или дополнения в пределах небольшого периода времени при помощи стандартного инструментария программного комплекса или же при помощи языка *CADINP*.

EN – Еврокоды

	Описание документа	Блок ед. измерения	Расчет системы
EN 1992-2004	<i>EN 1992-1 (2004)</i> <i>CAT AN/AP Building construction</i> (Строительство сооружений) Таблица 7.1 N <i>EN 1992-1-1</i> <i>CAT B, C, D Bridges</i> (Мосты)	5	A, B
EN 1993-2005	<i>EN 1993-1 (2005)</i> <i>CAT A Building construction</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Bridges</i> (Мосты)	5	A
EN 1994-2004	<i>EN 1994-1 (2004)</i> <i>CAT A Building construction</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Bridges</i> (Мосты)	5	A
EN 1995-2004	<i>EN 1995-1 (2004)</i>	5	A
EN 1992-1991	<i>EN 1992-1 (1991)</i>	5	A, B

DIN – Немецкие нормы

	Описание документа	Блок ед. измерения	Расчет системы
DIN EN1992-2004	<i>DIN EN 1992-1-1/NA:2013</i> <i>DIN EN 1992-2/NA:2013</i> <i>CAT AN/AP/AV Hochbau</i> <i>Тabelle 7.1 DE</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Brückenbau</i> (Строительство мостов)	5	A, B

	Описание документа	Блок ед. измерения	Расчет системы
<i>DIN EN1993-2005</i>	<i>DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12</i> <i>CAT A Hochbau</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Brückenbau</i> (Строительство мостов)	5	A
<i>DIN EN1994-2004</i>	<i>DIN EN 1992-1-1/NA:2010</i> <i>DIN EN 1994-2/NA:2010</i> <i>CAT AN/AP/AV Hochbau</i> <i>Tabelle 7.1 DE</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Brückenbau</i> (Строительство мостов)	5	A, B
<i>DIN 1045-2008</i>	<i>DIN 1045-1 (2008)</i> <i>CAT -/A/B/C/D/E/F</i> (Табл. 18) <i>Klassifizierung von Nachweis</i> <i>Bedingungen</i>	0	A, B
<i>DIN FB102-2009</i>	<i>DIN Fachbericht 102 (2009)</i> (Технический документация) <i>CAT A/B/C/D/E</i> (Табл. 4.118) <i>Klassifizierung von Nachweis</i> <i>Bedingungen</i>	0	A, B
<i>DIN FB103-2009</i>	<i>DIN Fachbericht 103 (2009)</i> (Технический документация)	2	A
<i>DIN FB104-2009</i>	<i>DIN Fachbericht 104 (2009)</i> (Техническая документация)	0	A

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
DIN 18800	<i>Stahlbau (Nov. 2008)</i> (Стальные конструкции) CAT A/B <i>A voreingestellte Überlagerung</i> <i>DIN 18800/предустановленная суперпозиция по DIN 18800</i> <i>B voreingestellte Überlagerung</i> <i>DIN 1055-100/предустановленная суперпозиция по DIN 1055-100</i>	2	A
DIN 1052-2008	<i>Holzbau (2008)</i> (Строительство деревянных конструкций)	0	A
DIN 1045-1	<i>DIN 1045-1 (2001)</i> CAT -/A/B/C/D/E/F (Табл. 18) <i>Klassifizierung von Nachweisbedingungen</i>	0	A, B
DIN FB102-2003	<i>DIN Fachbericht 102 (2003)</i> (Техническая документация) CAT A/B/C/D/E (Табл. 4.118) <i>Klassifizierung von Nachweisbedingungen</i>	0	A, B
DIN 1045-1	<i>Alte Norm (1988)</i> (Старые нормы) <i>DAfStb hochfest.Beton (1995)</i> (Высокопрочный бетон <i>DAfStb</i>)	0	A, B A
DIN 4227	<i>Alte Spannbetonnorm + Anhang A1 (1995)</i> (Старый стандарт предварительно напряженного бетона + Приложение A1 (1995))	0	A

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
<i>DIN FB103-2003</i>	<i>DIN Fachbericht 103 (2003)</i> (Техническая документация)	2	A
<i>DIN FB104-2003</i>	<i>DIN Fachbericht 104(2003)</i> (Техническая документация) <i>CAT A/B/C/D/E</i> (Табл. 4.118 из отчета 102) <i>Klassifizierung von Nachweis Bedingungen</i>	0	A
<i>DIN 18800-1990</i>	<i>Stahlbau (1990)</i> (Стальные конструкции)	2	A
<i>DIN 1052</i>	<i>Holzbau (1988)</i> (Строительство деревянных конструкций)	0	A

OEN – Австрийские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
<i>OEN EN1992-2004</i>	<i>OENORM B 1992-1 (2011)</i> <i>OENORM B 1992-2 (2008)</i> <i>CAT AN/AP/AV Hochbau</i> Tabelle 4 <i>B 1992-1-1</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Brückenbau B 1992-2</i> (Строительство мостов)	5	A, B
<i>OEN EN1993-2005</i>	<i>OENORM B 1993-1-1 (2007)</i> <i>CAT A Hochbau</i> (Строительство сооружений) <i>CAT B, C, D Brückenbau</i> (Строительство мостов)	5	A

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
OEN 4700	<i>Stahlbeton OENORM B 4700 (2001)</i> (Железобетон)	0	A, B
OEN 4750	<i>Spannbeton OENORM B 4750 (2000)</i> (Предварительно-напряженный бетон)	0	A
OEN 4300	<i>Stahl OENORM B 4300 (1994)</i> (Сталь)	0	A

Для старых нормативных документов *OEN 4200*, *OEN 4250*, *OEN 4253* в ПК *SOFiSTiK* не предусмотрены *INI*-файлы. Модуль *AQB* запрограммирован таким образом, что соответствующий расчет выполняется только с вводом нормативной базы/государственного стандарта. Параметр *BOE* вводится для бетона, а параметр *BSOE* для стали.

SIA – Швейцарские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
SIA 262	<i>Schweizer Betonbaunorm (2013)</i> (Бетон)	0	A, B
SIA 263	<i>Schweizer Stahlbaunorm (2003)</i> (Сталь)	2	A
SIA 265	<i>Schweizer Holzbaunorm (2003)</i> (Древесина)	0	A

BS – Британские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
BS EN1992-2004	<p>NA в BS EN 1992-1-1:2004 (2005)</p> <p><i>CAT AN/AP Building construction</i></p> <p><i>Table 7.1N EN 1992-1-1</i></p> <p><i>CAT B, C, D Bridges (Мосты)</i></p>	6	A, B
BS 8110	<p><i>British Standard Concrete (1997)</i></p> <p>(Бетон)</p> <p><i>HK/852</i> нормативная документация Гонконга</p>	6	A, B
BS 5400	<p><i>British Standard Concrete Bridge (1990)</i> (Бетон для строительства мостов)</p> <p><i>CAT 0</i> без преднапряжения</p> <p><i>CAT 1/2/3</i> Предварительное напряжение 1/2/3 класса</p> <p><i>HK/852</i> нормативная документация Гонконга</p> <p><i>IL/972</i> нормативная документация Израиля</p>	6	A
BS 5950	<p><i>British Standard Steelwork (2001)</i></p> <p>(Сталь)</p> <p><i>HK/852</i> нормативная документация Гонконга</p>	6	A

US – Американские нормы (ACI) и единые строительные нормы (UBC)

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
US ACI-318-14	<i>American Standard ACI / UBC (2014)</i>	9	A, B
US ACI-318-08	<i>American Standard ACI / UBC (2008)</i>	9	A
US AASHTO-2014	<i>American Highway (2014)</i> (Автомобильные дороги)	8	A
US AASHTO-2010	<i>American Highway (2010)</i> (Автомобильные дороги)	8	A
US AASHTO-2004	<i>American Highway (2005)</i> (Автомобильные дороги)	8	A
US AISC-2005	<i>American Standard AISC (Steel) 2005</i> (Нормы Американского института стальных конструкций)	9	A

SNIP – Российские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
SNIP 52101	СП 52-101-2003 (2004) (Бетон)	0	A, B
SNIP 20301	СНИП II 03,01-84 (89) (Бетон)	0	A, B
SNIP 22381	СНИП II 23.81 (89) (Сталь)	2	A

AS – Австралийские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
AS 3600	<i>Concrete Structures (2009)</i> (Бетонные конструкции)	6	A, B
AS 4100	<i>Structural Steel (1998)</i> (Металлоконструкции)	6	A
AS 5100	<i>Bridge Design (2004)</i> (Мосты)	6	A

IS – Индийские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
IS 456	<i>Indian Standard (2000)</i> (Бетон)	6	A
IS IRC112	<i>Indian Roads Congress: Code of Practice for Concrete Road Bridges (2011)</i> (Бетонные автодорожные мосты)	6	

UNE – Испанские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
UNE EHE	Свод правил по проектированию инженерных сооружений Уровень контроля качества: <i>EHE</i> Нормальный <i>EHE_INTENSIO</i> Усиленный <i>EHE_REDUCIDO</i> Минимальный	6	A

UNI – Итальянские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
UNI DM-2008	<i>Decreto Ministeriale 2008</i> (Государственный стандарт) <i>CAT A1 Costruzioni Civili</i> (Гражданское строительство) <i>CAT A2/A3 Ponti</i> (Мосты)	0	A, B
UNI DM-96	<i>Decreto Ministeriale 9. gennaio 1996</i> (Государственный стандарт от 09.01.1996):	0	A, B

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
	<p><i>Parte I: Cemento armato normale e precompresso</i> (Часть I: Обычный и предварительно напряженный железобетон)</p> <p><i>Parte II: Acciaio</i> (Часть II: Сталь)</p> <p><i>Parte III: Manufatti prefabbricati prodotti</i> (Часть III: Изделия заводского изготовления)</p> <p><i>Parte IV: Costruzioni composte d elementi in metallic</i> (Часть IV: Композитные металлоконструкции)</p> <p><i>Parte V: Per travi composte "acciaio - calcestruzzo"</i> (Часть V: Композитные сталежелезобетонные балки)</p>		

NF – Французская ассоциация стандартизации и сертификации AFNOR

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
NF EN1992-2004	<p><i>Annexe Nationale la NF EN 1992-1-1/-2</i> (Приложение к норм. документу)</p> <p><i>CAT AN/AP Vtiment</i> (Строительство сооружений) Табл. 7.1NF <i>NF EN 1992-1-1/NA</i></p> <p><i>CAT B, C, D Ponts</i> (Мосты)</p>	5	A, B
NF BAEL	Правила проектирования и расчета железобетонных конструкций и их возведения по методу предельных состояний. <i>BAEL/BPEL 91(1999)</i>	0	A, B

SS – Шведский Национальный совет по жилищному строительству (BKR)

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
SS EN1992-2004	Приложение к Еврокоду 2 <i>SS-EN 1992-1-1:2004/NA:2009,</i> <i>SS-EN 1992-2:2005/NA:2009</i> CAT: Здания A1 и класс надежности 1 Здания A2 и класс надежности 2 Здания A3 и класс надежности 3 B1 автомобильные мосты и класс надежности 1 B2 автомобильные мосты и класс надежности 2 B3 автомобильные мосты и класс надежности 3 C1 пешеходные мосты и класс надежности 1 C2 пешеходные мосты и класс надежности 2 C3 пешеходные мосты и класс надежности 3 D1 железнодорожные мосты и класс надежности 1 D2 железнодорожные мосты и класс надежности 2 D3 железнодорожные мосты и класс надежности 3	5	A, B

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
SS BBK-04	Руководство по проектированию бетонных конструкций CAT 1/2/3 (Класс надежности Низкий/Нормальный/Высокий)	0	A, B
SS BRO-2004	Управление дорожным строительством <i>BRO 2004</i>	0	A

DS – Датские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
DS EN1992-2004	Приложение к Еврокоду 2 EN 1992-1-1 DK NA:2011 CAT: <i>LE</i> низкий уровень надежности и расширенный контроль <i>NE</i> нормальный уровень надежности и расширенный контроль <i>HE</i> высокий уровень надежности и расширенный контроль <i>LN</i> низкий уровень надежности и нормальный контроль <i>NN</i> нормальный уровень надежности и нормальный контроль (по умолчанию) <i>HN</i> высокий уровень надежности и нормальный контроль	5	A, B

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
	<p><i>LR</i> низкий уровень надежности и сниженный контроль</p> <p><i>NR</i> нормальный уровень надежности и сниженный контроль</p> <p><i>HR</i> высокий уровень надежности и сниженный контроль</p> <p>- надежность классифицируется согласно <i>EN 1990 DK NA:2011</i></p> <p>- контроль классифицируется согласно <i>EN 1992-1-1 DK NA:2011</i></p>		
<i>DS 411</i>	<p>Нормы проектирования бетонных конструкций</p> <p>CAT:</p> <p><i>LE</i> низкий уровень надежности и расширенный контроль</p> <p><i>NE</i> нормальный уровень надежности и расширенный контроль</p> <p><i>HE</i> высокий уровень надежности и расширенный контроль</p> <p><i>LN</i> низкий уровень надежности и нормальный контроль</p> <p><i>NN</i> нормальный уровень надежности и нормальный контроль (по умолчанию)</p> <p><i>HN</i> высокий уровень надежности и нормальный контроль</p>	0	<i>A, B</i>

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
	<p><i>LR</i> низкий уровень надежности и сниженный контроль</p> <p><i>NR</i> нормальный уровень надежности и сниженный контроль</p> <p><i>HR</i> высокий уровень надежности и сниженный контроль</p>		
<i>DS 411-bro</i>	<p>Нормы проектирования бетонных конструкций</p> <p>Принимаются по умолчанию при создании суперпозиции для мостов</p>	3	<i>A, B</i>

NS – Норвежские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
<i>NS EN1992-2004</i>	<p>Приложение к Еврокоду 2</p> <p><i>NS-EN 1992-1-1:2004/NA:2008,</i></p> <p><i>NS-EN 1992-2:2005/NA:2010</i></p> <p>CAT:</p> <p><i>A1</i> Здания и класс надежности 1</p> <p><i>A2</i> Здания и класс надежности 2</p> <p><i>A3</i> Здания и класс надежности 3</p> <p><i>A4</i> Здания и класс надежности 4</p> <p><i>B</i> Автодорожный мост (класс надежности 3)</p> <p><i>C</i> Пешеходный мост (класс надежности 3)</p> <p><i>D</i> Железнодорожный мост (класс надежности 3)</p>	5	<i>A, B</i>

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
NS 3472	Проектирование металлоконструкций CAT 1/2/3/4 (Класс надежности) Малый / Средний / Высокий / Максимальный	0	A
NS 3473	Проектирование бетонных конструкций CAT 1/2/3/4 (Класс надежности) Малый / Средний / Высокий / Максимальный	0	A

NS – Финские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
SFS EN1992-2004	Приложение к Еврокоду 2 <i>SFS-EN 1992-1-1 NA:2007</i> CAT: <i>LE</i> низкий уровень надежности и расширенный контроль <i>NE</i> нормальный уровень надежности и расширенный контроль <i>HE</i> высокий уровень надежности и расширенный контроль <i>LN</i> низкий уровень надежности и нормальный контроль	5	A, B

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
	<p><i>NN</i> нормальный уровень надежности и нормальный контроль (по умолчанию)</p> <p><i>HN</i> высокий уровень надежности и нормальный контроль</p> <p><i>LR</i> низкий уровень надежности и сниженный контроль</p> <p><i>NR</i> нормальный уровень надежности и сниженный контроль</p> <p><i>HR</i> высокий уровень надежности и сниженный контроль</p> <p>- надежность классифицируется согласно <i>SFS-EN 1990 NA</i></p> <p>- контроль классифицируется согласно <i>SFS-EN 1992-1-1 NA:2007</i></p>		
<i>SFS TA1992-2004</i>	<p>Дополнение к Еврокоду 2 только для мостов</p> <p><i>CAT B, C, D, E</i> Мосты</p>	5	A

***NEN* – Голландские нормы**

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
<i>NEN EN1992-2004</i>	<p><i>NEN-EN 1992-1-1+C2/NB:2011</i></p> <p><i>CAT AN/AP Building construction</i> (Строительство сооружений) Табл. 7.1N <i>EN 1992-1-1</i></p> <p><i>CAT B, C, D</i> Мосты</p>	5	A, B

NBN – Бельгийские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
NBN EN1992-2004	<i>NBN EN 1992-1-1 ANB:2010</i> <i>CAT AN1-AN3/API-AP3 Building construction</i> (Строительство сооружений) Табл. 7.1N <i>EN 1992-1-1</i> <i>CAT B1-B3, C1C3, D1-D3 Мосты</i>	5	A, B
NBN EN1993-2005	<i>NBN EN 1993-1-1 ANB:2010</i> <i>CAT A1-A3 Строительство</i> <i>CAT B1-B3, C1C3, D1-D3 Мосты</i>	5	A

NZS – Новозеландские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
NZS 3101	<i>Concrete Structures Standard (1995)</i> (Проектирование бетонных сооружений)	6	A, B

GB – Китайские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
GB 50010	<i>Chinese Standard for Concrete Structures (2002)</i> (Проектирование бетонных сооружений)	0	A

NBR – Бразильские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
NBR 6118-2003	<i>Norma Brasileira, Projeto de estruturas de concreto – Procedimento</i> (Проектирование бетонных сооружений) CAT A Здания CAT B Автодорожные мосты CAT C Пешеходные мосты CAT D Железнодорожные мосты	5	A, B

ZA – Южноафриканские нормы

	Описание документа	Блок ед. изм-я	Расчет системы
ZA TMH7	<i>Code of Practice for the Design of Highway Bridges and Culverts in South Africa (1989)</i> (Свод правил по проектированию мостов и водопропускных труб) CAT 0 Без преднапряжения CAT 1/2/3 Преднапряжение 1/2/3 класса	6	A

3.7 MATE – Свойства материала

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала	-	1
<i>E</i>	Модуль упругости	[МПа] ₁₀₉₀	*
<i>MUE</i>	Коэффициент Пуассона (0,0 - 0,49)	-	*
<i>G</i>	Модуль упругости при сдвиге	[МПа] ₁₀₉₀	*
<i>K</i>	Объемный модуль упругости	[МПа] ₁₀₉₀	*
<i>GAM</i>	Удельный вес	[кН/м ³] ₁₀₉₀	25
<i>GAMA</i>	Удельный вес в состоянии плавучести	[кН/м ³] ₁₀₉₀	*
<i>ALFA</i>	Коэффициент теплового расширения	[1/К] ₁₀₈₃	<i>E-5</i>
<i>E90</i>	Модуль упругости анизотропного материала	[МПа] ₁₀₉₀	<i>E</i>
<i>M90</i>	Коэффициент Пуассона анизотропного материала	-	<i>MUE</i>
<i>OAL</i>	Меридианный угол анизотропного материала относительно локальной оси <i>x</i>	град.	0
<i>OAF</i>	Угол падения анизотропного материала относительно локальной оси <i>x</i>	град.	0
<i>SPM</i>	Коэффициент запаса по материалу	-	1.0
<i>FY</i>	Расчётная прочность материалов	[МПа] ₁₀₉₀	-
<i>FT</i>	Предельная прочность материала	[МПа] ₁₀₉₀	-
<i>TYPE</i>	Тип материала для установки значений свойств по умолчанию	<i>LIT</i>	-
<i>TITL</i>	Наименование материала	<i>Lit32</i>	-

Команда *MATE* позволяет ввести в систему те материалы, которые нельзя ввести при помощи команд *CONC*, *STEE*, *TIMB* или *BRIC*. Номер (*NO*) этих материалов не должен использоваться для обозначения других материалов.

При использовании значений параметра *TYPE*, список которых представлен ниже, значения расчетных характеристик (свойств) материала будут введены в систему по умолчанию:

<i>GLAS, ESG</i>	Листовое стекло, закаленное защитное стекло
<i>VSGh, VSGv</i>	Многослойное/небьющееся стекло (использование по горизонтали/по вертикали)
<i>TVG</i>	Низкотемпературное стекло
<i>Cu, Pb, Mg, W, Zn</i>	Медь, свинец, магний, вольфрам, цинк
<i>BRAS, BRON</i>	Латунь, бронза
<i>BRIC, SLBR, CLIN</i>	Кирпич, силикатный кирпич, клинкер
<i>IGYP, GYPS</i>	Изолированный гипс, обычная гипсовая штукатурка
<i>MOGY, MOCH, MOCE</i>	Гипс/мел/цементный раствор
<i>ASPH, BITU</i>	Асфальт, битум
<i>CARP, WOOL</i>	Защитное покрытие (бетон, асфальт, битум), строительный картон/вата (изоляционный материал)
<i>CORK, LINO</i>	Пробковый пол, линолеум
<i>EPOX, PHEN, PEST</i>	Эпоксидная, фенольная, полиэфирная смола
<i>ACRY, PC, PTFE</i>	Акрил, поликарбонат, политетрафторэтилен
<i>PVC, PMMA</i>	Поливинилхлорид, полиметилметакрилат
<i>POM, PA</i>	Полиацеталь, полиамид/нейлон

<i>PEHD, PELD</i>	Полиэтилен высокой/низкой плотности
<i>PS, PP, PUR</i>	Полистирол, полипропилен, полиуретан
<i>RUBB, NEOP, EBON</i>	Резина, неопрен, эбонит
<i>EPDM, PSUL, BUTA</i>	Этилен-пропилендиен, полисульфид, бутадиен
<i>SI, SILA</i>	Силикон, силикагель
<i>FOAM, FOAS, FOAU</i>	Вспененная резина, силикон, уретан
<i>FOAC, FOAR, FOAE</i>	Вспененный ПВХ (<i>PVC</i>), полиуретан (<i>PUR</i>), полиэтилен (<i>PE</i>)

Механические свойства этих материалов не всегда известны и не всегда имеют определенное значение. Данных характеристик даже не всегда достаточно для описания линейных свойств материала!

При геотехнических расчетах параметр *TYPE* может быть задан в соответствии с Унифицированной Системой Классификации Грунтов (*Unified Soil Classification System – USCS*):

<i>GW, SW</i>	Песок/гравий (щебень) хорошего гранулометрического состава
<i>GP, SP</i>	Песок/ гравий (щебень) плохого гранулометрического состава
<i>GM, SM</i>	Песок/ гравий (щебень) с большим процентом илистых/пылеватых частиц
<i>GC, SC</i>	Песок/ гравий (щебень) с большим процентом глинисты частиц
<i>ML, MI, MH</i>	Ил низкой (тугопластичный), средней,

высокой пластичности

CL, CI, CH Глина низкой (тугопластичный), средней, высокой пластичности

ROC1, ROC2 Кристаллическая порода, осадочная порода

ROC3, ROC4 Легкий осадок, пористая порода

Разновидность мелкозернистых грунтов по показателю текучести будет определяться одноосной силой FY , которая может быть введена в систему при помощи следующих параметров:

- :P** Мягкопластичный ($0.5 < I_C < 0.75$; $FY < 120$ кН/м²)
- :S** Текучепластичный ($0.75 < I_C < 1.00$; 120 кН/м² $< FY < 300$ кН/м²)
- :H** Текучий ($1.00 < I_C$; 300 кН/м² $< FY < 700$ кН/м²)
- :F** Обводненный (700 кН/м² $< FY$)

Ниже приведена таблица Б.19 из ГОСТа 25100-2011 «Грунты. Классификация», в которой представлена разновидность глинистых грунтов по показателю текучести I_L :

Разновидность глинистых грунтов	Показатель текучести I_L
Супесь:	
– твердая	$I_L < 0.00$
– пластичная	$0,00 \leq I_L < 1.00$
– текучая	$I_L > 1.00$
Суглинки и глины:	
– твердые	$I_L < 0.00$
– полутвердые	$0.00 \leq I_L < 0.25$
– тугопластичные	$0.25 < I_L \leq 0.50$
– мягкопластичные	$0.50 < I_L \leq 0.75$
– текучепластичные	$0.75 < I_L \leq 1.00$
– текучие	$I_L > 1.00$

В дальнейшем параметр *TYPE* может использоваться для предварительной настройки постоянных (в зависимости от температуры) по значению характеристик сплошных сред:

AIR Воздух (1 бар, 20 °С)

H2O Вода (1 бар, 10 °С)

CO2, O2, N2, Углекислый газ, кислород, азот, метан

CH4

HE, NE, AR, KR, Гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, гексафторид серы

XE, SF6

Где, *MUE* – кинематическая вязкость ν [м²/сек]. Иногда удобнее выразить упругие постоянные через другие характеристики, чем через модуль упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона. Ниже представлены альтернативные формулы:

E – модуль упругости;

E_s – коэффициент постели (ограничение по горизонтали);

K - объемный модуль упругости;

G - модуль упругости при сдвиге;

μ – коэффициент Пуассона.

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)} \qquad G = \frac{E}{2(1+\mu)} \qquad (3.1)$$

$$E = \frac{9 \cdot K \cdot G}{(3K + G)} \qquad \mu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G} \qquad (3.2)$$

$$E_s = E \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \qquad (3.3)$$

$$G = \frac{3 \cdot K \cdot E}{9 \cdot K - E} \qquad G = \frac{3 \cdot K \cdot (1-2\mu)}{2 \cdot (1+\mu)} \qquad (3.4)$$

Если значения упругих постоянных не указаны, то пропущенные значения будут рассчитаны в соответствии с этими формулами. Несмотря на это, пользователь может собственноручно ввести в систему несогласованные (не подходящие друг относительно друга) между собой значения констант. Если значения не заданы, то модуль упругости E , по умолчанию, равен 30000 МПа, а параметр MUE равен 0,0.

Свойства ортотропии могут определяться через материал и толщину плоских *QUAD* элементов. (см. команда *QUAD* в руководствах к модулям *SOFiMSHA*, *ASE* и *TALPA*).

Согласно работам Лехницкого С. Г. трансверсально ортотропные (частный случай трансверсальной анизотропии) материалы характеризуются различием свойств в одном направлении от двух других направлений, перпендикулярных первому, у которых свойства одинаковы (изотропия свойств). Это касается большинства практических задач, связанных с применением таких материалов, как древесина и камень. Для крупных сортиментов древесины, когда нельзя пренебречь кривизной годичных слоев, а зачастую наблюдается еще и неправильная ориентация сечений по отношению к годичным слоям (бруски, доски), учитывается различие только между свойствами вдоль и поперек волокон (трансверсальная анизотропия). К сожалению, введение значений общих констант материала в случае древесины несовместимо с условиями трансверсальной ортотропии, поэтому настоятельно рекомендуется использовать команду *TIMB* для ввода в систему деревянных элементов.

Основные значения параметров E и μ характеризуют изотропную плоскость, тогда как параметр E_{90} (в таблице *MAT* указано старое обозначение – EY) характеризуют нормаль (перпендикулярную плоскость) к этой плоскости, а параметры μ_{90} и G_{90} (внимание: параметр G_{90} соответствует параметру G) характеризуют поперечную плоскость, расположенную между нормалью и изотропной плоскостью, и пересекающую их. Поскольку ось z является нормалью в расчетной системе, мы получаем следующие расчетные формулы:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \mu_{90} \cdot \frac{\sigma_z}{E_{90}} \quad (3.5a)$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_x}{E} - \mu_{90} \cdot \frac{\sigma_z}{E_{90}} \quad (3.5b)$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_{90}} - \mu_{90}^* \cdot \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \quad (3.5c)$$

$$\mu_{90}^* = \mu_{90} \cdot \frac{E}{E_{90}} \quad (3.5d)$$

Следует отметить, что соотношение коэффициентов Пуассона μ_{90} и μ_{90}^* больше не ограничивается предельным значением 0.5 (это справедливо для изотропного материала). Согласно приведенной выше формуле (3.5d) их отношение определяется отношением модулей упругости; это сохраняет симметрию матрицы деформации, которая требуется для выполнения элементарных условий равновесия системы.

Порядок индексов компонент напряжений и деформаций для последующих уравнений имеют следующий вид:

[x y z xy xz yz] общий случай объемной системы

[x y xy z] плоскодеформированное состояние, осевая симметрия

[x y xy] плоское напряженное состояние

В случае симметричной системы (осевая симметрия) ось x обозначает ось вращения, y – радиальное направление и z – тангенциальное/касательное направление.

Кроме того, необходимо учитывать следующие условия:

$$E_1 = E, E_2 = E_{90}, \mu_1 = \mu, \mu_2 = \mu_{90}, G_1 = \frac{E_1}{2(1 + \mu_1)}, G_2 = G \quad (3.6)$$

Общий случай объемной системы:

Трехмерная/объемная матрица свойств материала образуется в результате инверсии зависимости напряжений от деформации и имеет вид (ось z является нормалью, проходящей через изотропную плоскость):

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} E_1 \cdot \frac{1-n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_1+n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_1+n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{1-n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & E_2 \cdot \frac{1-\mu_1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$n = \frac{E_1}{E_2}, \quad m = 1 - \mu_1 - 2 \cdot n \cdot \mu_2^2 \quad (3.8)$$

Плоскодеформированное состояние:

Здесь имеется различие с общим случаем объемной системы. В данном случае уже ось u является нормалью, проходящей через изотропную плоскость. Учитывая все характерные особенности, приведенная матрица жесткости материала будет иметь вид:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} E_1 \cdot \frac{1-n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & E_2 \cdot \frac{1-\mu_1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_1+n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$n = \frac{E_1}{E_2}, \quad m = 1 - \mu_1 - 2 \cdot n \cdot \mu_2^2 \quad (3.10)$$

Плоское напряженное состояние:

Здесь имеется различие с общим случаем объемной системы. В данном случае уже ось u является нормалью, проходящей через изотропную плоскость. Матрица жесткости материала получается путем инверсии приведенной трехмерной/пространственной матрицы напряжений-деформаций элемента. Матрица жесткости имеет следующий вид:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1-n\cdot\mu_2^2} & \frac{E_1\cdot\mu_2}{1-n\cdot\mu_2^2} & 0 \\ \frac{E_1\cdot\mu_2}{1-n\cdot\mu_2^2} & \frac{E_2}{1-n\cdot\mu_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \end{bmatrix}, n = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.11)$$

Осевая симметрия:

Общий случай анизотропии материала рассматривать не нужно, так как в таких условиях невозможно достичь осевой симметрии. На практике интерес представляет случай с использованием слоистого материала, в котором ось вращения x нормальна (перпендикулярна) к плоскости изотропии. В таком случае матрица жесткости материала имеет вид:

$$\mathbf{D} = A \cdot \begin{bmatrix} \frac{1-\mu_1^2}{n} & \mu_2(1+\mu_1) & 0 & \mu_2(1+\mu_1) \\ \mu_2(1+\mu_1) & (1-n\mu_2^2) & 0 & \mu_1+n\mu_2^2 \\ 0 & 0 & \frac{G_{90}}{A} & 0 \\ \mu_2(1+\mu_1) & \mu_1+n\mu_2^2 & 0 & 1-n\mu_2^2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A = \frac{E_2 \cdot n}{(1+\mu_1) \cdot m}, n = \frac{E_1}{E_2}, m = 1 - \mu_1 - 2 \cdot n \cdot \mu_2^2 \quad (3.13)$$

Наклонная ортотропия:

Возможно также рассмотрение «наклонной» ортотропии. В геологии пространственное положение изотропной плоскости определяется при помощи меридиана и угла падения. Данные параметры характеризуют угол отклонения наиболее крутого угла в северном направлении и угол залегания грунтовых слоев. Математически данные углы эквивалентны первому и третьему углам Эйлера. Преобразование системы осуществляется двумя вращениями: вокруг северной оси (N), соответствующей направлению оси y расчетного элемента, и оси G , соответствующей направлению оси z расчетного элемента. Оси K , N и G формируют правую декартову систему координат.

Преобразование осуществляется следующим образом:

1. Вращение осей K и N при помощи меридианного угла (параметр OAL) вокруг оси G
2. Последующее наклонение повернутой системы ($K', N', G'=G$) на угол падения (параметр OAF) вокруг оси K' .

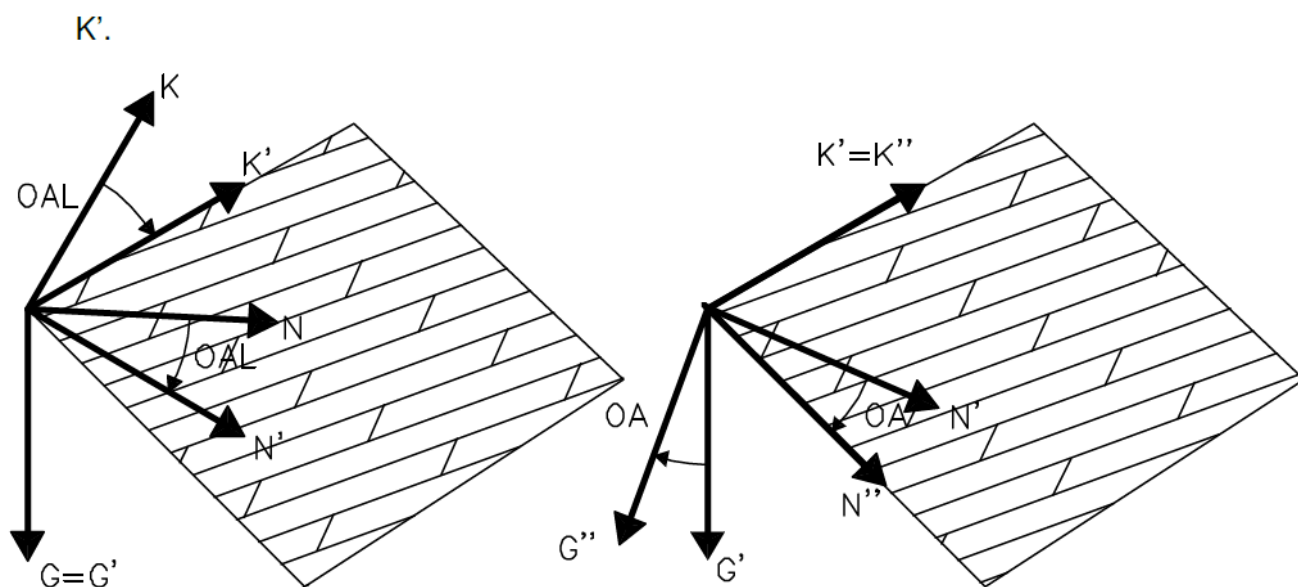


Рис. 3.2 – Пример наклонной ортотропии

Помимо объемных бесконечных элементов сплошной среды (грунтовой массив) эти правила преобразования применяются также к оболочкам и пластинам.

Для плоских систем (модуль *TALPA*) значение параметра OAL характеризует угол залегания грунтовых слоев, то есть угол между осью x и линией слоя грунтового основания. Параметр OAF при создании и расчете плоских систем не используется.

При осевой симметрии параметры OAF и OAL не используются (см. выше).

3.8 MAT - Общие свойства материала

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала	-	1
<i>E</i>	Модуль упругости	[кН/м ²] ₁₀₈₈	*
<i>MUE</i>	Коэффициент Пуассона (0,0 - 0,49)	-	0.2
<i>G</i>	Модуль упругости при сдвиге	[кН/м ²] ₁₀₈₈	*
<i>K</i>	Объемный модуль упругости	[кН/м ²] ₁₀₈₈	*
<i>GAM</i>	Удельный вес	[кН/м ³] ₁₀₉₁	25
<i>GAMA</i>	Плаваемость тела	[кН/м ³] ₁₀₉₁	*
<i>ALFA</i>	Коэффициент теплового расширения	[1/К] ₁₀₈₃	<i>E-5</i>
<i>EY</i>	Модуль упругости анизотропного материала E_y	[кН/м ²] ₁₀₈₈	<i>E</i>
<i>MXY</i>	Коэффициент Пуассона анизотропного материала $m-xu$	-	<i>MUE</i>
<i>OAL</i>	Меридианный угол анизотропного материала относительно локальной оси x	град.	0
<i>OAF</i>	Угол падения анизотропного материала относительно локальной оси x	град.	0
<i>SPM</i>	Коэффициент запаса по материалу	-	1.0
<i>TITL</i>	Наименование материала	<i>Lit32</i>	-

Материалы, которые могут использоваться для *SVAL* или *QUAD* и *BRIC* элементов, могут быть введены в систему с помощью команд *MAT* и *MATE*. Номера задействованных материалов (*NO*) не должно использоваться при вводе других материалов.

Основными различиями между двумя командами являются используемые единицы измерения. Команда *MATE* позволяет ввести в систему характеристики *CONC*, *STEE* и др. материалов в МПа, а также позволяет ввести дополнительные прочностные характеристик, в то время как команда *MAT* позволяет ввести

характеристик нелинейных материалов *NMAT* в кН/м². Команда *MAT* имеет более старые наименования ортотропных параметров.

3.9 *MLAY* – Слоистый материал

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер композитного материала	-	1
<i>T0</i>	Толщина первого слоя	*	!
<i>NO0</i>	Номер материала первого слоя	-	!
<i>T1</i>	Толщина второго слоя	*	!
<i>NO0</i>	Номер материала второго слоя	-	!
...			
<i>T9</i>	Толщина восьмого слоя	*	!
<i>NO9</i>	Номер материала восьмого слоя	-	!
<i>TITL</i>	Маркировка материала по ГОСТу	<i>Lit32</i>	-

С помощью команды *MLAY* вы можете ввести в расчетную систему плоский *QUAD* элемент (-ы), состоящий из нескольких слоев различных материалов – композитный материал до 10 слоев. Толщина каждого слоя может быть задана в системе, как в виде положительной абсолютной величины, так и в виде отрицательной относительной. Общая толщина элемента будет подогнана под значение суммы толщин материалов, введенных в расчетную систему. Если некоторые слои имеют отрицательную толщину, только эти слои будут адаптированы программой под требования всей расчетной системы. В противном случае произойдет однородное масштабирование всей системы.

Если в вашу расчетную систему необходимо ввести сэндвич-элемент с двумя внешними слоями, состоящими из слоистого пластика с заданной толщиной, то данный ввод выглядит следующим образом:

```

MLAY 9    0.02 1 ! верхний слой слоистого пластика
          -1.00 2 ! средний слой -//-
          0.02 1 ! нижний слой -//-
    
```

Данный ввод в расчетную систему соответствует двум плоским *QUAD* элементам с общей толщиной 0,10 или 0,15, однако, его можно представить следующим образом:

MLAY - 0.02 1 ! верхний слой слоистого пластика

0.06 2 ! средний слой -//-, если общая толщина равна 0,10

0.02 1 ! нижний слой -//-

MLAY - 0.02 1 ! верхний слой -//-

0.11 2 ! средний слой -//-, если общая толщина равна 0,15

0.02 1 ! нижний слой -//-

При нелинейных расчетах системы введенные материалы сохраняются в базе данных с осредненными значениями характеристик.

3.10 NMAT – Нелинейный материал

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала	-	1
<i>TYPE</i>	<p>Тип используемого материала</p> <p><i>LINE</i> Линейный материал</p> <p><i>VMIS</i> Вязкопластичный материал – модель работы фон Мизеса</p> <p><i>DRUC</i> Вязкопластичный материал – модель работы Друкера-Прагера</p> <p><i>MOHR</i> Модель работы грунта Кулона - Мора</p> <p><i>GRAN</i> Модель с независимым упрочнением формоизменения и уплотнения грунта</p> <p><i>SWEL</i> Увеличение объема грунта/набухающие грунты</p> <p><i>FAUL</i> Дефекты/повреждения в скальных грунтах</p> <p><i>ROCK</i> Скальный грунт/материал</p> <p><i>MISE</i> Модель работы материала Фон Мизеса/Друкера-Прагера</p> <p><i>GUDE</i> Модель работы грунта Гудехуса (<i>Gudehus</i>)</p> <p><i>LADE</i> Модель работы грунта Ладе (<i>Lade</i>)</p> <p><i>MEMB</i> Текстильные навесы/мембраны</p> <p><i>USP1</i> Параметры от <i>USP1</i> до <i>USP8</i> и <i>USD1</i> до <i>USD8</i> отведены специально под</p>	<i>LIT</i>	!

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
	пользовательские нужды для создания собственных моделей работы материалов		
<i>P1</i>	1-ый параметр расчетной модели материала	*	-
<i>P2</i>	2-ой параметр -//-	*	-
<i>P3</i>	3-ий параметр -//-	*	-
<i>P4</i>	4-ый параметр -//-	*	-
...			
<i>P12</i>	12-ый параметр -//-	*	-

Типы моделей работы материалов, применяемых в процессе расчета, и значения их параметров изложены на последующих страницах данного руководства.

При линейном анализе системы процесс получения и последующего анализа функции текучести для нелинейного материала достаточно прост. Это позволяет определить у материала области с нелинейными свойствами для проведения последующего нелинейного анализа.

Если в систему введен параметр *TYPE LINE*, то материал останется линейным.

3.10.1 Инварианты/постоянные величины тензора напряжений

В настоящей главе, если не изменять предварительные установки, рассмотрены следующие условия.

- Первый главный инвариант тензора напряжений Коши σ определяется как:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (3.14)$$

- Тогда тензор девиаторных напряжений можно определить по формуле $s = \sigma - (I_1/3)$:

$$s_x = \sigma_x - \frac{I_1}{3} \quad (3.15a)$$

$$s_y = \sigma_y - \frac{I_1}{3} \quad (3.15b)$$

$$s_z = \sigma_z - \frac{I_1}{3} \quad (3.15c)$$

Второй и третий главные инварианты тензора девиаторных напряжений определяются по формуле:

$$J_2 = \frac{1}{2}(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 \quad (3.16a)$$

$$J_3 = s_x s_y s_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} - s_x \tau_{yz}^2 - s_y \tau_{xz}^2 - s_z \tau_{xy}^2 \quad (3.16b)$$

Логически связанные между собой величины, рассмотренные ранее, часто применяется для описания поверхности текучести связного фрикционного грунта:

$$p = \frac{I_1}{3} \quad (3.17a)$$

$$q = \sqrt{3 \cdot J_2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (3.17b)$$

$$r = 3 \left(\frac{1}{2} J_3 \right)^{1/3} \quad (3.17c)$$

где, p – гидростатическое напряжение/нагрузка;

q – девиаторное напряжение.

Третий блок широко используемых инвариантов (ξ , ρ , θ) характеризует цилиндрическую систему координат – пространство напряжений Хей–Вестергаард:

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \quad (3.18a)$$

$$\rho = \sqrt{2 \cdot J_2} \quad (3.18b)$$

$$\cos(3\theta_{hw}) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad \text{with} \quad 0 \leq \theta_{hw} \leq +\frac{\pi}{3} \quad (3.18c)$$

ПРИМЕЧАНИЕ: (*Haigh–Westergaard stress space*. В механике сплошных сред, Хей–Вестергаардское пространство напряжений, или просто пространство напряжений – это трехмерное пространство, в котором три пространственные оси представляют собой три главных напряжения, которые возникают в теле, подверженному действию нагружения.

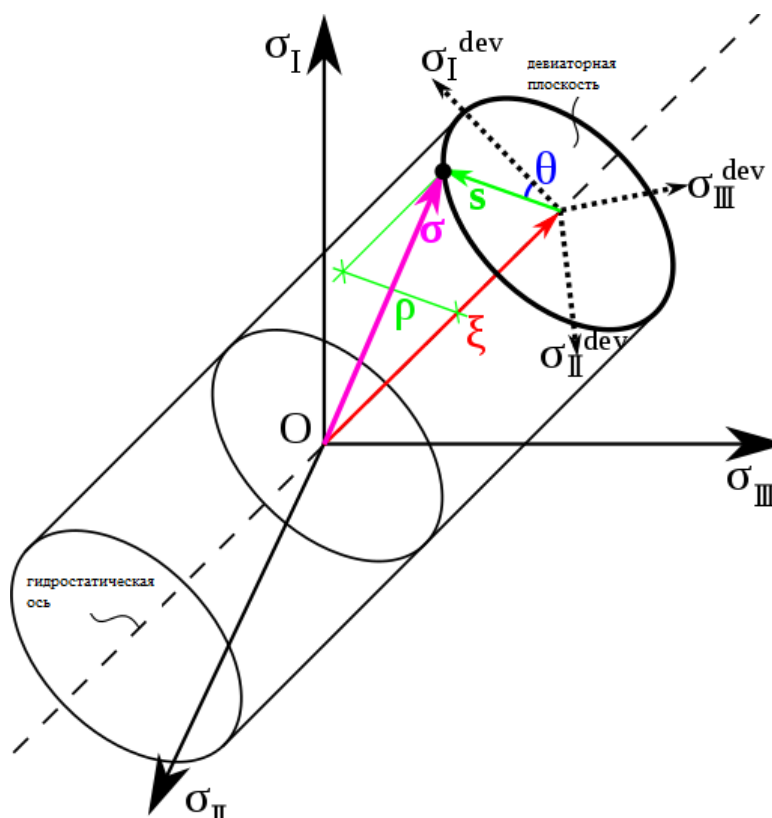


Рис. 3.3 – Пример визуализации тензора напряжений Коши σ в Хей-Вестергаардском пространстве напряжений

В данном руководстве, если не изменять предварительные установки, для определения значения параметра Лоде θ применяется альтернативная формула:

$$\sin(3\theta) = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad \text{при} \quad -\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq +\frac{\pi}{6} \quad (3.19)$$

3.10.2 Параметры материала

Нелинейные параметры материала должны выбираться пользователем очень внимательно. Также, исходя из механики грунтов и механики горных пород, особенно важными являются те параметры, которые характеризуют местоположение проектируемого сооружения – основание. В литературе/нормативных документах рассматриваются некоторые из этих параметров (например, *EC7*, *DIN 1055 part 2*, *EAU*), но эти параметры вряд ли пригодны для проведения нелинейного анализа по методу конечных элементов *FEM*. Несмотря на то, что в данном руководстве рассмотрены примеры с использованием данных параметров, производитель и распространитель данного программного комплекса снимает с себя всю ответственность, касаемо правильного выбора значений рассматриваемых параметров, независимо от уровня проектируемого сооружения.

Угол внутреннего трения

Угол внутреннего трения равен нулю для большинства мелкозернистых связных грунтов в условиях полного отсутствия отвода воды – недренированный /неосушенный грунтовый слой. Грунты с углом внутреннего трения более 40 градусов встречается достаточно редко.

ПРИМЕЧАНИЕ: Уклон грунтового массива без соответствующего сцепления или укрепления не может быть больше (круче), чем конечное значение угла внутреннего трения грунта/материала, из которого состоит сам массив.

Сцепление/связность

Для осушенных и неосушенных грунтовых слоев необходимо четко различать понятия сцепление/связность и трение. В мелкозернистых грунтах создается поровое давление при приложении внезапного нагружения, что в результате значительно снижает возможное трение между частицами грунта. Также и со связностью грунта, которая через некоторое время уменьшится в 10

раз, после того, как вода испарится, а трение, в результате ухода всей влаги, возрастет.

Дилатансия

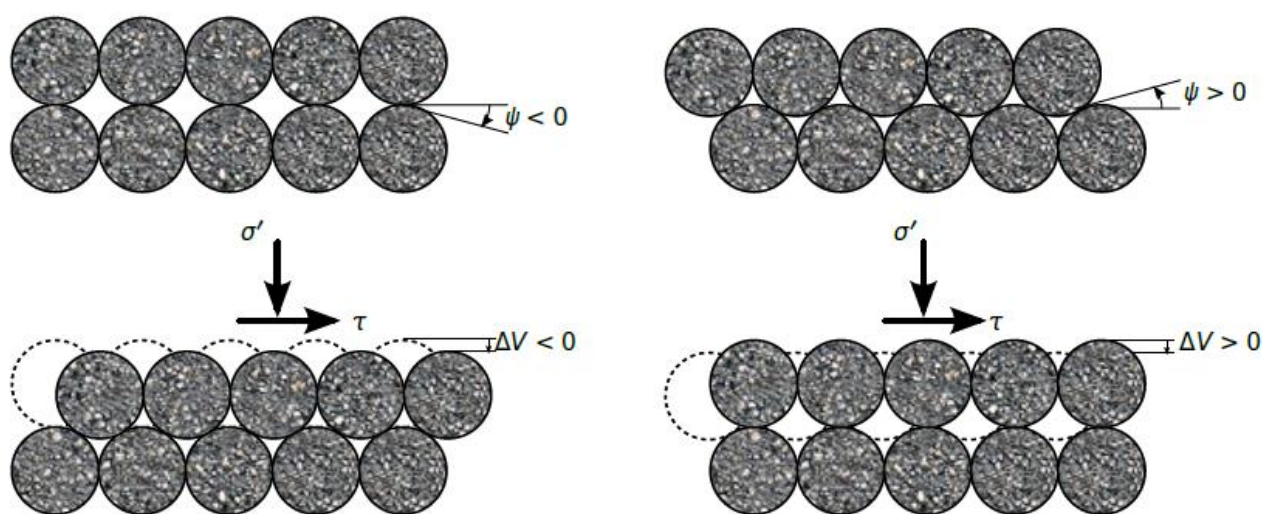
Дилатансия – изменение объема, наблюдаемое в зернистых материалах, когда они подвергаются сдвиговым деформациям. Величина, которая используется для описания эффекта дилатансии, называется углом дилатансии ψ :

- $\psi < 0$ соответствует пластической деформации, связанной с уменьшением объема материала (процесс уплотнения);
- $\psi = 0$ соответствует обычным пластическим деформациям (имеет место при испытании, например, стали);
- $\psi > 0$ соответствует пластическим деформациям, возникающим в результате увеличением объема материала (разуплотнение).

Пластические деформационные свойства грунтов зависят от их эффективной плотности, которая, в свою очередь, изменяется в зависимости от состояния нагруженности грунта. Учитывая приведенные в предыдущем предложении факты можно сделать вывод, что угол дилатансии на самом деле не является постоянной величиной. Данная зависимость угла дилатансии от напряжений хорошо описывается известной теорией [4], которая связывает значение мобилизованного угла дилатансии ψ_m с фактическим уровнем деформаций при сдвиге, причем последний характеризуется значением мобилизованного угла внутреннего трения материала φ'_m (см. п.п. 3.10 *NMAT* Модель с независимым упрочнением формоизменения и уплотнения грунта *NMAT – GRAN*).

В механике грунтов для наглядного представления эффекта дилатансии грунта, находящегося в нормальном состоянии (*NC*) и сверхуплотнённом состоянии (*OC*), сам грунтовый массив представляют в виде сферических частиц/элементов (рис. 3.4), расположенных в определенном порядке. В случае

плохо уплотненного грунта любая деформация сдвига приведет к большему уплотнению его частиц с последующим уменьшением объема, что соответствует процессу уплотнения грунта (рис. 3.4a). Этот процесс характеризуется отрицательным значением угла дилатансии ψ . С другой стороны, сдвиг изначально уплотненного грунта возможен только при увеличении его объема (разуплотнении) (рис. 3.3b). Этот процесс также известен как дилатансия, и он характеризуется положительным значением угла дилатансии ψ .



Плохо уплотненный грунт
(a) (нормальное состояние)
 Следует $\Rightarrow \psi < 0$ и $\Delta V < 0$

Уплотненный грунт:
(b)
 Следует $\Rightarrow \psi > 0$ и $\Delta V > 0$

Рис. 3.4 – Модель грунта, представленная в виде сферических частиц: сжатие (уплотнение) и расширение (разуплотнение) при сдвиге

Самый простой способ понять механический смысл угла дилатансии – это посмотреть на реакцию грунта в плоскодеформированном состоянии при действии сдвига τ_{yx} (рис. 3.5).

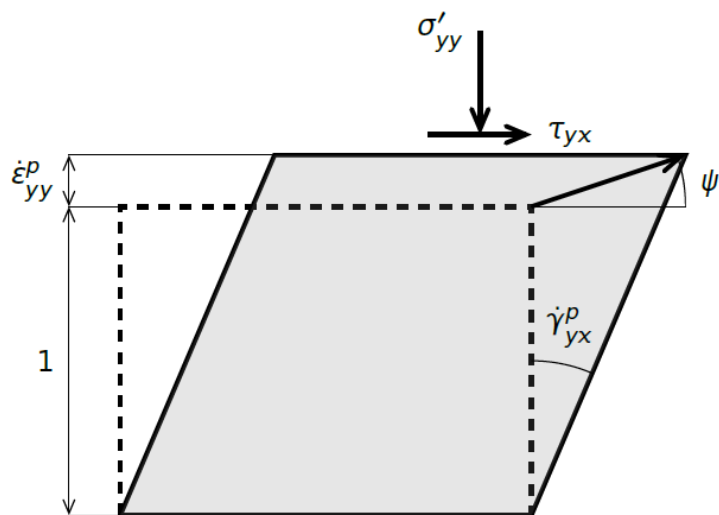


Рис. 3.5 – Грунт в плоскодеформированном состоянии, механический смысл угла дилатансии ψ

Из рисунка 3.5 следует, что

$$\tan \psi = \frac{\dot{\epsilon}_{yy}^p}{\dot{\gamma}_{yx}^p}, \quad (3.20)$$

где, $\dot{\epsilon}_{yy}^p$ – интенсивность пластической деформации в направлении оси y , характеризующая изменение объема;

$\dot{\gamma}_{yx}^p$ – интенсивность пластической деформации при сдвиге.

Внутреннее трение хорошо уплотненного сыпучего материала состоит из трения при скольжении частиц материала друг о друга, увеличенного за счет дополнительного трения, возникающего в результате расклинивания частиц (гранул) материала между собой. Влияние дилатансии на механические свойства грунта или, точнее, на угол внутреннего трения можно наглядно продемонстрировать при помощи пилообразной модели (*sawtooth model*), представленной на рисунке 3.6 [5]. Предполагается, что угол внутреннего трения неуплотненного грунта, когда градиент объема равен нулю (постоянный объем), является постоянным значением и характеризует только сопротивление трению между частицами грунта. Этот угол называется критическим углом внутреннего трения и обычно обозначается как φ'_{cv} . При уплотнении грунта за счет взаимного сцепления между частицами (гранулами) грунта расслоение или напластование

слоев происходит не вдоль прямой горизонтальной плоскости $s - s$, а вдоль пилообразных плоскостей $t - t$ с углом наклона ψ_m , который называется мобилизованным углом дилатансии. Тогда мобилизованный угол внутреннего трения φ'_m вдоль воображаемой горизонтальной плоскости сдвига $s - s$, определяется как сумма угла внутреннего трения φ'_{cv} вдоль наклонных плоскостей сдвига $t - t$ и мобилизованного угла дилатансии ψ_m , которая задает угол наклона плоскостей $t - t$, т. е.

$$\varphi'_m = \varphi'_{cv} + \psi_m . \quad (3.21)$$

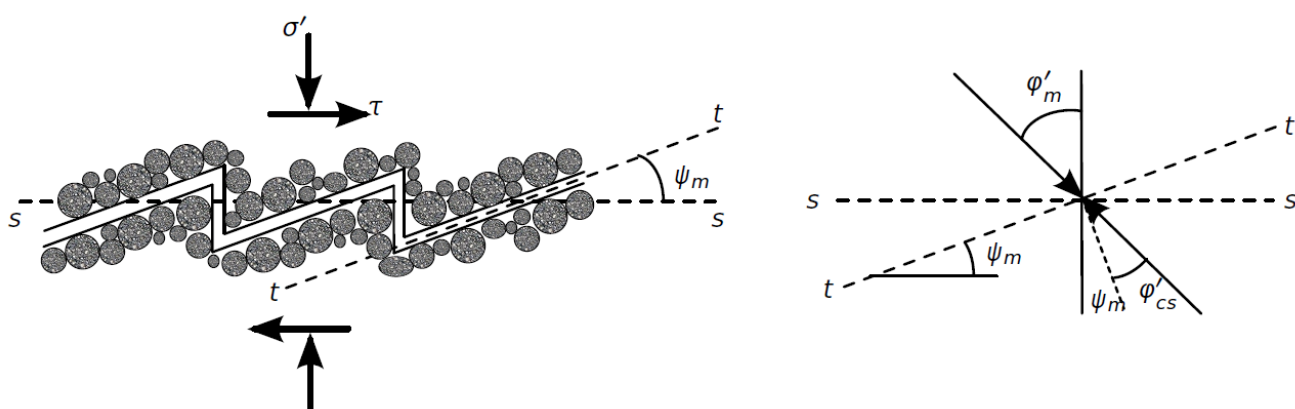


Рис. 3.6 – Пилообразная модель (*sawtooth model*) для отображения влияния дилатансии

При трехосном испытании грунта процесс расширения является более сложным, чем это было описано при помощи пилообразной модели, но в общем случае данная реакция является аналогичной. При трехосном испытании зависимость между мобилизованным углом дилатансии и интенсивностью пластических деформаций может быть представлена следующим образом:

$$\sin \psi_m = \frac{\dot{\varepsilon}_v^p}{\dot{\gamma}^p} , \quad (3.22)$$

где, $\dot{\varepsilon}_v^p$ – значение пластической объемной деформации;

$\dot{\gamma}^p = \dot{\varepsilon}_1^p + \dot{\varepsilon}_2^p + \dot{\varepsilon}_3^p$ – мера пластической деформации сдвига.

На рисунке 3.7а схематически показаны различия в свойствах при трехосном испытании между грунтом, находящимся в нормальном состоянии (*NC*), и грунтом, находящимся в сверхуплотненном состоянии (*OC*). Как отмечалось ранее, при сдвиге обычный (нормальный) грунт начинает уплотняться, в то время как сверхуплотненный грунт начинает увеличиваться в объеме (разуплотнение, дилатансия) после небольшой усадки, происходящей в самом начале процесса – нижний левый график $\varepsilon_v - \varepsilon_a$. Для грунтов *NC* девиаторное напряжение характеризуется кривой продольных (осевых) деформаций, которая монотонно увеличивается до момента, пока не будет достигнута прочность материала на сдвиг q_{cs} – верхний левый график $q - \varepsilon_a$. С другой стороны, грунты *OC* достигают своей прочности на сдвиг q_{peak} при максимальном их объеме или дилатансии – максимальный наклон кривой на графике $\varepsilon_v - \varepsilon_a$, за которым следует уменьшение жесткости на сдвиг до уровня q_{cs} – верхний левый график $q - \varepsilon_a$, что соответствует градиенту нулевой объемной деформации. Это состояние также известно как критическое состояние (*critical state*).

На рисунке 3.7б показана зависимость мобилизованного угла внутреннего трения φ'_m от продольных (осевых) деформаций при сдвиге для грунтов *OC* – верхний правый график $\varphi'_m - \varepsilon_a$. Значение φ'_f на графике характеризует переход материала между уплотненным и разуплотненным (дилатантным) состоянием (данный процесс также называется «фазовый переход»). Выше данного уровня продольных деформаций грунт считается разуплотненным. На графике значение φ'_f находится между значением угла внутреннего трения φ'_{cs} , соответствующему критическому состоянию, и значением угла трения между частицами (гранулами) грунта φ'_μ . Разница между значениями углов трения $[\varphi'_\mu, \varphi'_{cs}]$ не превышает пары градусов [6]. Для уплотненных грунтов, значение угла φ'_f будет ближе к значению φ'_μ . Для рыхлых (разуплотненных) грунтов, а также грунтов в плоскодеформированном состоянии значение угла φ'_f будет ближе к верхнему пределу, т. е. к значению предельного состояния φ'_{cs} . Пиковое значение угла

внутреннего трения φ'_{peak} соответствует максимально разуплотненному (дилатантному) состоянию грунта, т. е. ψ_{peak} .

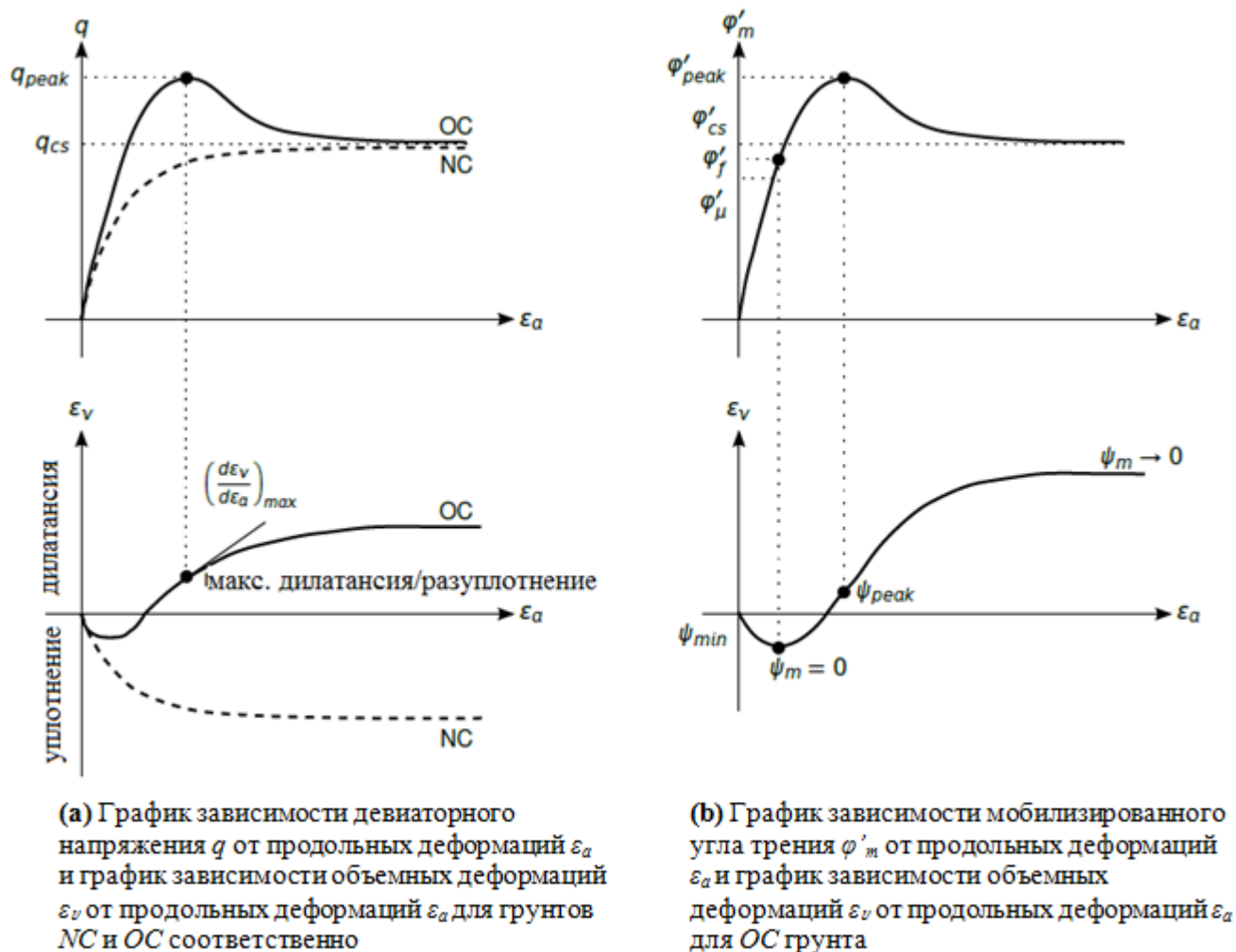


Рис. 3.7 – Трехосное испытание осушенного (дренированного) грунта

(*мобилизованного угла трения φ'_m)

Очевидно, что дилатансия не является постоянной характеристикой, т.к. она зависит от уровня напряженности материала/грунта. В большинстве передовых моделей, описывающих работу грунта, данный факт учтен, что позволяет пользователю принять во внимание зависимость значения угла дилатансии от напряжений. Одной из самых известных моделей, учитывающих дилатантность грунтов, является модель Роу (*Rowe*) [4]. Эта модель описывает зависимость между мобилизованным углом дилатансии ψ_m и мобилизованным углом внутреннего трения φ'_m следующим образом

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi'_m - \sin \varphi'_f}{1 - \sin \varphi'_m \sin \varphi'_f} \quad (3.23)$$

Мобилизованный угол внутреннего трения φ'_m представляет собой меру напряжения, и его можно рассчитать по следующей формуле

$$\sin \varphi'_m = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2c \cdot \cot \varphi - \sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (3.24)$$

Формула модели Роу (3.23) представлена на рисунке 3.8.

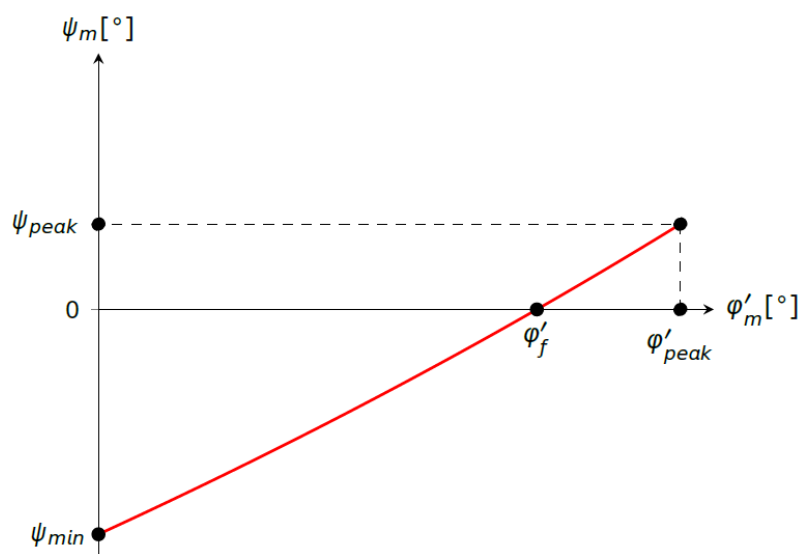


Рис. 3.8 – Зависимость значения мобилизованного угла дилатансии от мобилизованного угла внутреннего трения грунта по модели Роу [4]

Классические модели, описывающие работу упругопластического материала (например, *MOHR*, *DRUC*), учитывают постоянное значение угла дилатансии. Если же явление дилатантности имеет значительное влияние на конечный результат расчета системы (например, при наличии распора), следует тщательно анализировать преобладающую нагрузку. В грубом виде на практике можно принять следующие значения угла дилатансии: для уплотненных грунтов значение $+\varphi/2$; для средне уплотненных грунтов значение 0.0; для рыхлых (сыпучих) грунтов значение $-\varphi/2$.

Модель *GRAN* напротив, включает в себя учет изменчивости значения угла дилатансии в зависимости от состояния нагруженности грунта в соответствии с

ранее рассмотренной теорией зависимости дилатантности грунта от возникающих в нем напряжений (см. п.п. 3.10.7 данного руководства).

Прочность на одноосное растяжение

Поскольку возникновение растягивающих напряжений в грунтах в большинстве случаев не допускается, для большинства грунтов будет применяться усечение в области растяжения. Однако, исходя из математических соображений, было бы более целесообразно задать небольшое значение прочности при одноосном растяжении собственноручно, например, когда грунты становятся свободными от напряжений, возникающих на их поверхности.

3.10.3 Нелинейные переменные состояния (параметры упрочнения)

На общие законы нелинейности свойств материала обычно влияет история его нагружения. Поэтому данные по каждому этапу нагружения и соответствующие им переменные состояния материала сохраняются в базе данных, которые впоследствии могут быть визуализированы при помощи модуля *WinGRAF* во время последующей их обработки. В дальнейшем будет составлено краткое описание всех полученных результатов.

Распространение пластических деформаций (количество пластификаций)

Значение соответствующей функции текучести для “нескорректированного” напряженного состояния (линейно-упругое состояние) может быть рассчитано в единицах напряжения. Если значение > 0 , материал подвергается пластификации. Значение функции текучести рассчитывается заново на каждом этапе нагружения. Таким образом, в областях материала, в которых, возможно, ранее и возникали пластические деформации, на следующем этапе нагружения, при перерасчете, значение функции может быть < 0 – отсутствие пластификации. При

использовании модели *GRAN* рассчитывается значение функции ползучести *MOHR*.

Для модели работы материала/грунта *GRAN* количество пластификаций является идентификатором, который содержит более подробную информация о текущем состоянии нагружения (см. описание модели *GRAN* “Модель с независимым упрочнением формоизменения и уплотнения грунта”) – только вместо сохранения текущего значения функции текучести.

Объемная пластическая деформация

Значение объемной пластической деформации $\int \varepsilon_{p,v} = \int \dot{\varepsilon}_{p,v}$ (скалярная величина) состоит из соответствующих значений интенсивности деформаций.

$$\dot{\varepsilon}_{p,v} = \dot{\varepsilon}_{p,x} + \dot{\varepsilon}_{p,y} + \dot{\varepsilon}_{p,z} \quad (3.25)$$

Девиаторная пластическая деформация

Девиаторная пластическая деформация $\int \varepsilon_{p,dev} = \int \dot{\varepsilon}_{p,dev}$ (скалярная величина) состоит из соответствующих значений интенсивности деформаций. Данный параметр характеризует нейтральную часть (при сдвиге) от значения объемной пластической деформации:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{p,dev} &= \sqrt{\frac{2}{3} \left[\dot{\varepsilon}_{p,x}^2 + \dot{\varepsilon}_{p,y}^2 + \dot{\varepsilon}_{p,z}^2 + \frac{1}{2} (\dot{\gamma}_{p,xy}^2 + \dot{\gamma}_{p,yz}^2 + \dot{\gamma}_{p,xz}^2) \right]} \quad (3.26a) \\ &= \sqrt{\frac{2}{9} \left[(\dot{\varepsilon}_{p,x} - \dot{\varepsilon}_{p,y})^2 + (\dot{\varepsilon}_{p,y} - \dot{\varepsilon}_{p,z})^2 + (\dot{\varepsilon}_{p,x} - \dot{\varepsilon}_{p,z})^2 \right] + \frac{1}{3} (\dot{\gamma}_{p,xy}^2 + \dot{\gamma}_{p,yz}^2 + \dot{\gamma}_{p,xz}^2)} \end{aligned}$$

где,

$$\dot{\varepsilon}_{p,i} \equiv \dot{\varepsilon}_{p,i} - \frac{\varepsilon_{p,v}}{3}, \quad i = x, y, z \quad (3.27a)$$

$$\Rightarrow \sum_{i=x,y,z} \dot{\varepsilon}_{p,i}^2 = \frac{1}{3} \left[(\dot{\varepsilon}_{p,x} - \dot{\varepsilon}_{p,y})^2 + (\dot{\varepsilon}_{p,y} - \dot{\varepsilon}_{p,z})^2 + (\dot{\varepsilon}_{p,x} - \dot{\varepsilon}_{p,z})^2 \right] \quad (3.27b)$$

Примечание

По результатам трехосного испытания при условии тождественного равенства $\int \varepsilon_{p,1} \equiv \int \varepsilon_{p,2}$ получаем

$$\dot{\varepsilon}_{p,dev} = \frac{2}{3} |\dot{\varepsilon}_{p,1} - \dot{\varepsilon}_{p,3}| = \frac{1}{3} |\dot{\varepsilon}_{p,v} - 3\dot{\varepsilon}_{p,3}| \quad (3.28)$$

Предположив, что доля объемной пластической деформации незначительна, она может быть уменьшена дополнительно до значения

$$\dot{\varepsilon}_{p,dev} \approx |\dot{\varepsilon}_{p,3}| \quad (3.29)$$

Мобилизованный угол внутреннего трения φ_m

Метод измерения степени сдвиговой деформации основан на критерии Кулона-Мора (модель Кулона-Мора). Данный критерий характеризуется следующей формулой:

$$\sin \varphi_m = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2c \cdot \cot \varphi - \sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (3.30)$$

Коэффициент использования

Соотношение $u \equiv \varphi_m / \varphi_{inp} \leq 1$, в котором вводный параметр материала φ_{inp} характеризует максимальное (конечное) значение угла внутреннего трения (индекс *inp* обозначает “вводный” – *input*).

3.10.4 VMIS – Свойства вязкопластичного материала (модель Фон Мизеса)

Упругопластический материал, моделируемый в соответствии с критерием Фон Мизеса (модель Фон Мизеса), с учетом ассоциированного закона текучести и возможного вязкопластического расширения/увеличения объема.

Область применения

Данный параметр применяется при моделировании металлов и других материалы без трения, а также для моделирования эффектов ползучести.

Используемые характеристики:

<i>VMIS</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Напряжение при текучести материала	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P2</i>	Модуль упругости (касательный модуль упругости)	[кН/м ²] ₁₀₈₈	0.0
<i>P10</i>	Тип закона/функции ползучести (функция перенапряжения материала) 0 без учета вязкости, упругопластический материал 1 модель Пэжины	-	0
<i>P11</i>	Параметр ползучести, экспонента $m \geq 1,00$	-	1.0
<i>P12</i>	Динамическая вязкость/коэффициент динамической вязкости $\eta \geq 0,00$	[кНс/м ²] ₁₂₂₀	0.0

Условие текучести выражается в виде математической формулы:

$$f = \sqrt{3} \cdot J_2 - p_1 \leq 0 \quad (3.31)$$

Моделирование свойств вязкопластического материала основано на модели Пэжины. Учитывая это, деформации вязкопластического материала рассчитываются по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon^{VP} &= \int_{t_0}^t \dot{\varepsilon}^{VP} d\tau \\ &= \int_{t_0}^t \dot{\lambda} \cdot \frac{\partial g(\sigma, \kappa)}{\partial \sigma} d\tau \\ &= \int_{t_0}^t \frac{\langle \Phi(f(\sigma, \kappa)) \rangle}{\eta} \cdot \frac{\partial g(\sigma, \kappa)}{\partial \sigma} d\tau \end{aligned} \quad (3.32)$$

При учете ассоциированного закона текучести (например, при моделировании работы материала по критерию фон Мизеса) потенциал пластической деформации g равен значению функции текучести. Функция перенапряжения материала Φ выглядит следующим образом:

$$\langle \Phi \rangle = \begin{cases} f(\sigma, \kappa)^m & , f \geq 0 \\ 0 & , f < 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

Эта часто используемая функция может быть откалибрована, чтобы была возможность максимально адекватно воспроизводить широкий диапазон зависимых от времени явлений, возникающих в материале при его нагружении.

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [7], [8], [9] и [10] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.5 DRUC – Свойства вязкопластичного материала (модель Друкера-Прагера)

Данная функция описывает модель упругопластического материала с учетом конической поверхности текучести Друкера-Прагера (*DRUCKER/PRAGER*) и, как необязательное для использования дополнение, с учетом неассоциированного закона текучести. Также в данной модели учтены предельные значения растягивающих напряжений (предел прочности при растяжении) и некоторые дополнительные свойства вязкопластичных материалов.

Область применения

Данный параметр применяется при моделировании различных грунтов (сыпучих/скальных) с учетом трения и/или связности между их частицами, а также для моделирования различных явлений, возникающих в материале от действия нагружения, которые зависят от времени (например, моделирование прочности материала при действии кратковременного нагружения).

Используемые характеристики:

<i>VMIS</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Угол внутреннего трения φ < 0 внутри пирамиды ≥ 0 снаружи пирамиды	[°]	!
<i>P2</i>	Связность грунта c	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P3</i>	Предел прочности на разрыв f_t	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0.0
<i>P4</i>	Угол дилатансии ψ	[°]	0.0
<i>P5</i>	не используется	-	-
<i>P6</i>	Предельное значение пластической деформации $\varepsilon_{p, dev, u}$	[‰] ₁₀₈₁	0.0
<i>P7</i>	Предельное значение угла внутреннего трения φ_u	[°]	<i>P1</i>
<i>P8</i>	Предельное значение связности грунта c_u	[кН/м ²] ₁₀₈₉	<i>P2</i>
<i>P10</i>	Тип закона/функции ползучести (функция перенапряжения материала) 0 без учета вязкости, упругопластический материал 1 модель Пэжины	-	0.0
<i>P11</i>	Параметр ползучести, экспонента $m \geq 1,00$	-	1.0
<i>P12</i>	Динамическая вязкость/коэффициент динамической вязкости $\eta \geq 0,00$	[кНс/м ²] ₁₂₂₀	0.0

Математические формулы, характеризующие условие пластичности и потенциал пластической деформации с учетом значений инвариантов напряжений, выглядят следующим образом:

$$f = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)} \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)} \leq 0 \quad (3.34a)$$

$$g = \frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \psi)} \cdot I_1 + \sqrt{J_2} \quad (3.34b)$$

Данные формулы характеризуют пирамиду, образующуюся в пространстве главных напряжений, которая будет соответствовать поверхности текучести (пирамида Кулона-Мора) – знак «-», либо будет проходить по касательной с внутренней стороны к этой поверхности – знак «+».

Моделирование процесса увеличения в объеме вязкопластичного материала изложено в п.п. 3.10.4 данного руководства (*NMAT VMIS*).

Усечение в области растяжения

По умолчанию поверхность текучести Друкера-Прагера образуется исходя из значения предела прочности при растяжении:

$$\mathbf{f} = \sigma_{I,II,III} - f_t \leq 0 \quad (3.35)$$

где, $\sigma_{I, II, III}$ – вектор главных напряжений;

f_t – прочность на растяжение.

Калибровка системы, исходя из одноосного (линейного) и двухосного (плоского) напряженного состояния

Для последующего дифференцирования используется слегка измененный вариант условия текучести, выраженного в уравнении 3.34а, в котором учитывается гидростатическая нагрузка p (уравнение 3.17а) и девиаторное напряжение q (уравнение 3.17б). Кроме того, необходимо уделить особое внимание тем случаям, которые соответствуют внешней стороне пирамиды (знак «-»).

$$f = \frac{2 \sin \varphi}{(3 - \sin \varphi)} \cdot 3p + q - \frac{6 \cos \varphi}{(3 - \sin \varphi)} \cdot c \leq 0 \quad (3.36)$$

Поверхность текучести Друкера-Прагера характеризуется двумя параметрами прочности φ и c , которые могут быть получены исходя из двух условий разрушения грунта/материала. Значение первого параметра формируется по результатам одноосного (линейного) воздействия/сжатия, а значение второго параметра формируется по результатам двухосного (плоского) воздействия/сжатия.

Учитывая линейную прочность на сжатие f_c , соответствующее разрушающее напряжение можно выразить следующим образом:

$$\sigma_{ux,lim} = \begin{pmatrix} -f_c \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow p = -\frac{1}{3}f_c ; q = f_c \quad (3.37)$$

Для многих материалов, в частности бетона, повышенная прочность $f_{c2c} = a \cdot f_c$ может определяться экспериментально при двухосном испытании на сжатие [11]. Для учета подобных условий в программу был введен коэффициент усиления a . Соответствующее разрушающее напряжение при двухосном испытании материала можно выразить следующим образом:

$$\sigma_{bx,lim} = \begin{pmatrix} -a \cdot f_c \\ -a \cdot f_c \\ 0 \end{pmatrix} \Rightarrow p = -\frac{2}{3}a \cdot f_c ; q = a \cdot f_c \quad (3.38)$$

Соответствующие условия разрушения материала $f(\sigma_{ux,lim}) \stackrel{!}{=} 0$ и $f(\sigma_{bx,lim}) \stackrel{!}{=} 0$ представлены в виде двух уравнений, решение которых позволяет определить значения двух прочностных параметров материала/грунта, а именно φ и c .

В результате, подставив уравнения 3.37 и 3.38 в уравнение 3.36, получаем следующее:

$$\left(-\frac{\sin \varphi}{3 \cos \varphi} + \frac{(3 - \sin \varphi)}{6 \cos \varphi} \right) \cdot f_c - c \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.39a)$$

$$\left(-2 \frac{\sin \varphi}{3 \cos \varphi} + \frac{(3 - \sin \varphi)}{6 \cos \varphi} \right) \cdot a \cdot f_c - c \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.39b)$$

В итоге, при помощи соответствующих математических действий получаем требуемые формулы расчета прочностных характеристик материала/грунта:

$$\sin\varphi = \frac{3a-3}{5a-3} \quad (3.40a)$$

$$c = \frac{1-\sin\varphi}{2 \cdot \cos\varphi} \cdot f_c \quad (3.40b)$$

Примечание

При отсутствии экспериментальных данных [12] предлагается следующая формула расчета прочности материала/грунта при двухосном испытании f_{c2c}

$$f_{c2c} = \underbrace{\left(1,2 - \frac{f_c[\text{МПа}]}{1000}\right)}_a \cdot f_c \quad (3.41)$$

Предположив, что прочность бетона $a \approx 1,16$, из уравнений 3.40а и 3.40б можно получить следующие значения характеристик:

$$\varphi \approx 10^\circ \quad \text{и} \quad c \approx 0,42 \cdot f_c \quad (3.29)$$

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [9] и [8] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.6 МОHR – Свойства вязкопластичного материала (модель Кулона-Мора)

Упругопластический материал, моделируемый в соответствии с критерием Кулона-Мора (модель Кулона-Мора), с учетом неассоциированного закона текучести. Также в данной модели учтены предельные значения растягивающих напряжений (предел при растяжении) и некоторые дополнительные свойства вязкопластичных материалов.

Область применения

Данный параметр применяется при моделировании различных грунтов (сыпучих/скальных) с учетом трения и/или связности между их частицами, а также для моделирования различных явлений, возникающих в материале от действия нагружения, которые зависят от времени (например, моделирование прочности материала при действии кратковременного нагружения).

Используемые характеристики:

МОНР	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Угол внутреннего трения φ < 0 внутри пирамиды ≥ 0 снаружи пирамиды	[°]	!
<i>P2</i>	Связность грунта c	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P3</i>	Предел прочности на разрыв f_t	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0,0
<i>P4</i>	Угол дилатансии ψ	[°]	0,0
<i>P5</i>	не используется	-	-
<i>P6</i>	Предельное значение пластической деформации $\varepsilon_{p, dev, u}$	[‰] ₁₀₈₁	0,0
<i>P7</i>	Предельное значение угла внутреннего трения φ_u	[°]	<i>P1</i>
<i>P8</i>	Предельное значение связности грунта c_u	[кН/м ²] ₁₀₈₉	<i>P2</i>
<i>P10</i>	Тип закона/функции ползучести (функция перенапряжения материала) 0 без учета вязкости, упругопластический материал 1 модель Пэжины (<i>Perzyna model</i>)	-	0,0
<i>P11</i>	Параметр ползучести, экспонента $m \geq 1,00$	-	1,0
<i>P12</i>	Динамическая вязкость/коэффициент динамической вязкости $\eta \geq 0,00$	[кНс/м ²] ₁₂₂₀	0,0

Математические формулы, характеризующие условие пластичности и потенциал пластической деформации с учетом значений инвариантов напряжений, выглядят следующим образом:

$$f = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.43a)$$

$$g = \frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3}} (3 \pm \sin \psi) \cdot I_1 + \sqrt{J_2} \quad (3.43b)$$

Примечание

Следующее уравнение лучше всего подходит для проверки критерия текучести:

$$f = \sigma_1 - \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \cdot \sigma_3 - \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (3.44)$$

Моделирование процесса увеличения в объеме вязкопластичного материала изложено в п.п. 3.10.4 данного руководства (*NMAT VMIS*).

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [9] и [8] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.7 GRAN – Модель с независимым упрочнением формоизменения и уплотнения грунта

Формоизменение (увеличение в объеме) упругопластического материал с оптимизированным режимом упрочнения (однократное и двойное упрочнение) для грунтов.

Область применения

Данный параметр применяется для моделирования жесткости грунта и режима упрочнения грунта, а также для проведения расчетного анализа грунтового массива/основания.

Используемые характеристики:

<i>GRAN</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Угол внутреннего трения φ	[°]	!
<i>P2</i>	Связность грунта c	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P3</i>	Предел прочности на разрыв f_t	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0,00
<i>P4</i>	Угол дилатансии ψ	[°]	0,00
<i>P5</i>	Модуль упругости $E_{s, ref}$ (расширенная модель <i>GRAN</i>)	[кН/м ²] ₁₀₈₈	*
<i>P6</i>	Коэффициент бокового давления грунта K_0^{nc} (расширенная модель <i>GRAN</i>)	-	$1 - \sin\varphi$
<i>P9</i>	Модуль первичного нагружения $E_{50, ref}$	[кН/м ²] ₁₀₈₈	!
<i>P10</i>	Экспонента $m \geq 0$	-	0,70
<i>P11</i>	Коэффициент отказов/разрушения $0,50 < R_f < 1,00$	-	0,90
<i>P12</i>	Начальное/эталонное давление $p_{ref} > 0,00$	[кН/м ²] ₁₀₈₉	100

Расширенная версия модели *GRAN* (двухповерхностная модель текучести, двойное упрочнение) активируется путем ввода в систему одометрического модуля упругости $E_{s, ref}$ (*P5*) – только в этом случае будет учитываться коэффициент бокового давления грунта K_0^{nc} (*P6*). В случае отсутствия в расчетной системе значения $E_{s, ref}$, программа задействует базовую/исходную версию модели *GRAN* (модель с одной поверхностью текучести, однократное упрочнение).

Процесс упрочнения основан на гиперболическом соотношении напряжений к деформациям [13], которое было получено из результатов трехосного испытания. Процесс упрочнения ограничен прочностью материала, характеризуемой классическим критерием разрушения/прочности материала Кулона-Мора. Кроме того, рассматриваемая модель работы материала учитывает жесткость, которая напрямую зависит от напряжения, согласно уравнениям (3.4-3.6). Еще одной важной особенностью модели является способность учитывать состояние нагружения системы и, следовательно, автоматически учитывать различные жесткости материала в режимах первичного нагружения, перегрузки и разгрузки расчетной системы.

В последующих формулировках процесс сжатия и усадки вводятся с отрицательным знаком, а главные напряжения определяются исходя из соотношения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Таким образом, для формулировки результатов трехосного испытания индексом 3 обозначается осевое (продольное) направление, а индекс 1 обозначается поперечные к оси направления.

Краткое описание существенных особенностей модели GRAN:

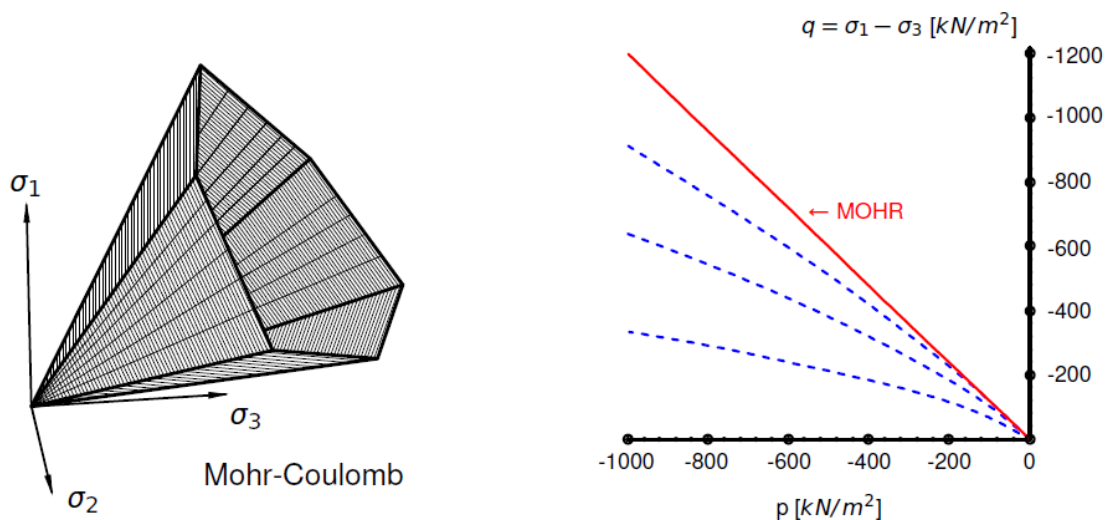


Рис. 3.9 – Графическое представление модели Кулона-Мора

- девиаторное упрочнение, основанное на гиперболическом соотношении напряжений к деформациям [13]

⇒ пластическая деформация возникает раньше, чем в системе возникнет усилие, равное максимальному значению прочности при сдвиге

расчетные характеристики: $E_{50, ref}$, R_f

- сдвиговая прочность (критерии прочности материала Кулона-Мора)

расчетные характеристики: φ , c

- необязательный учет свойств дилатансии (неассоциированный закон течения)

расчетные характеристики: ψ

- зависимость жесткости от напряжений

расчетные характеристики: m , p_{ref}

- зависимость жесткости от условий нагружения

⇒ нужно различать первичное нагружение от перегрузки и разгрузки расчетной системы

расчетные характеристики: E_{ur} , μ (упругость вводится при помощи команд *MAT* или *MATE*)

- необязательное ограничение прочности при растяжении (усечение в области растяжения)

расчетные характеристики: f_t

Расширенная версия модели является улучшенной версией базовой модели за счет дополнительной двухпараметрической поверхности упрочнения, ограниченная предельными значениями прочностных характеристик. Соответствующая калибровка поверхности упрочнения позволяет

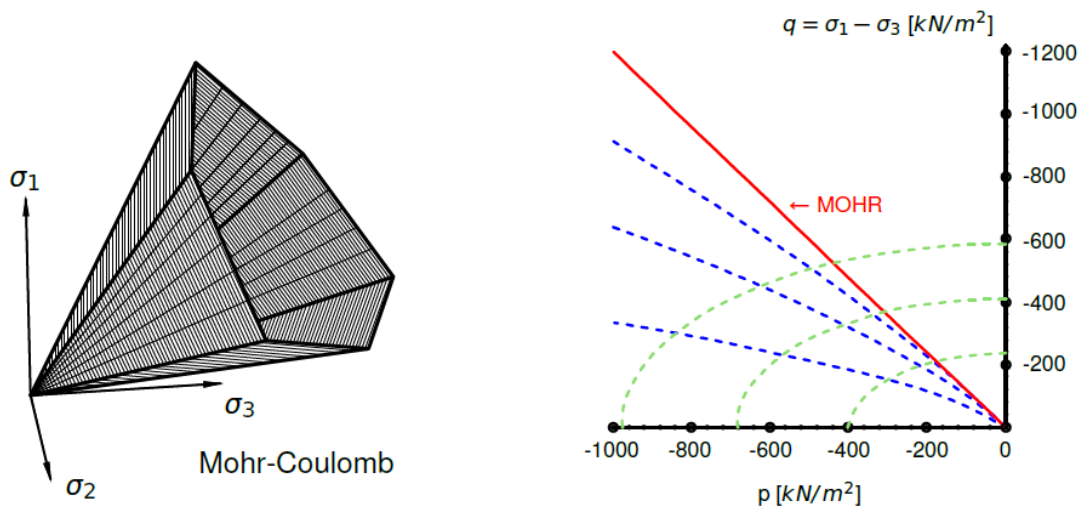


Рис. 3.10 – Графическое представление модели Кулона-Мора

- адекватно (максимально реалистично) смоделировать поведение материала и его жесткость при первичном сжатии (испытание грунта в одометре/одометрическое испытание) \Rightarrow пластическое деформирование
 - сохранить адекватное соотношение бокового и продольного напряжений для учета коэффициента бокового давления грунта $K_0^{nc} = \frac{\sigma_{lateral}}{\sigma_{axial}}$, например, исходя из условия $K_0^{nc} = 1 - \sin\varphi$
- расчетные характеристики: $E_{s, ref}, K_0^{nc}, (m; p_{ref})$

Прочностные свойства и характеристики упрочнения

Согласно информации, приведенной в [13], свойства осушенного (дренированного) сыпучего грунта, подверженного трехосному испытанию, могут быть сформулированы в виде следующего уравнения:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{-\varepsilon_3}{b - a \cdot \varepsilon_3}, \quad (3.45)$$

с учетом условий

$$\frac{1}{b} = E_i \approx 2 \cdot E_{50}, \quad (3.46a)$$

$$\frac{1}{a} = q_a = \frac{q_f}{R_f}, \quad (3.46b)$$

где, ε_3 – продольная (осевая) деформация;

q – девиаторное напряжение;

q_a – целевое (асимптотическое) значение девиаторного напряжения;

E_i – начальная жесткость.

Дункан и Чанг [14] (*Duncan & Chang*) усовершенствовали эту формулу, введя в нее пороговое значение девиаторного напряжения q в виде предельного значения девиаторного напряжения, равного $q_f = q_a \cdot R_f$. Отношение между значениями q_f и q_a характеризуется коэффициентом отказа R_f , который меньше 1.0.

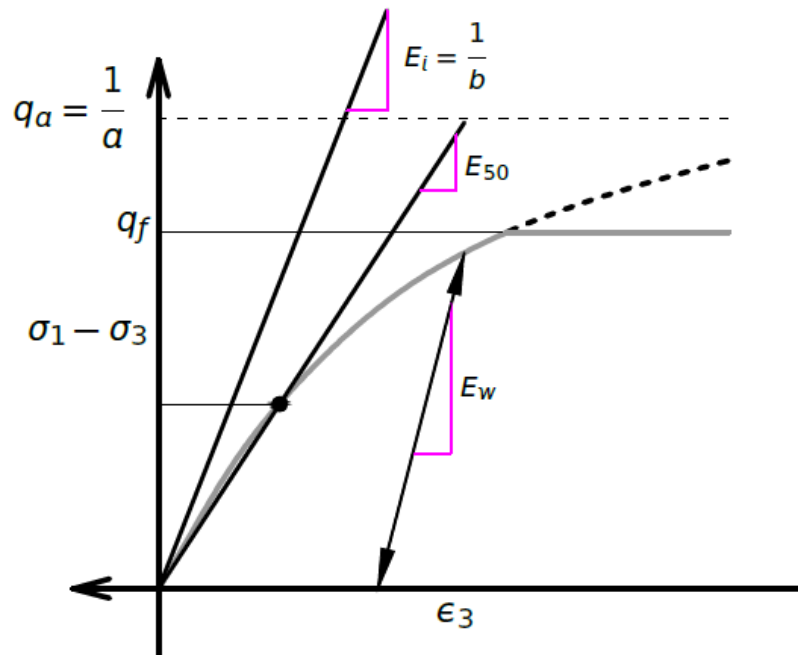


Рис. 3.11 – Зависимость напряжений от деформаций [13]

Зависимость жесткости от напряжений

Сыпучие материалы обладают жесткостью, которая зависит от напряженного состояния (и от степени уплотнения). Усовершенствованный подход (*Ohde 1939, 1951*), который основан на результатах одометрических испытаний, и, учитывая связность грунта, включает в себя зависимость одометрического модуля от эффективного напряженного состояния в грунте (эффективное продольное сжимающее напряжение):

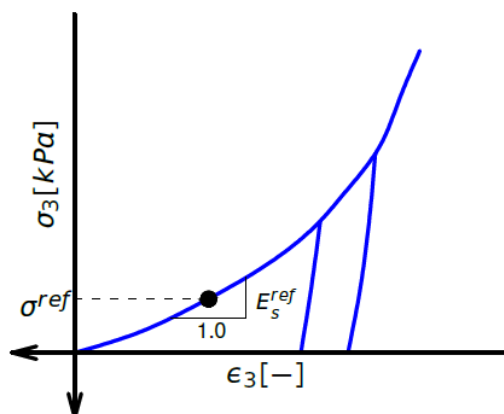


Рис. 3.12 – Зависимость напряжений от деформаций по результатам одометрических испытаний

$$E_s = E_{s,ref} \cdot \left(\frac{|\sigma_3| \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi}{p_{ref} \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi} \right)^m \quad (3.47)$$

Значение параметра m обычно изменяется в пределах от 0,4 до 0,75.

В отличие от условий, которыми сопровождается одометрическое испытание, при трехосном испытании боковое расширение не ограничивается. Из-за измененных граничных условий значение модуля упругости значительно отличается от модулей упругости E_{50} , полученных в результате трехосного испытания. Параметр E_{50} характеризует секущую жесткость (секущий модуль деформации), которая соответствует 50-процентам от максимального значения мобилизованной сдвиговой прочности (рис. 3.10). При выборе меньшего сжимающего напряжения σ_1 в качестве эталонного напряжения, можно вывести отношение, аналогичное уравнению (3.47), которое позволяет доказать изменение значения модуля упругости E_{50} , возникающее при трехосном испытании грунта [13, 14] и которое затем используется в соответствующих уравнениях модели поведения грунта (3.45) - (3.46).

$$E_{50} = E_{50,ref} \cdot \left(\frac{|\sigma_1| \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi}{p_{ref} \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi} \right)^m \quad (3.48)$$

Аналогичный подход используется при моделировании упругой разгрузки и упругой перегрузки расчетной схемы, а также жесткости и текучести:

$$E_{ur} = E_{ur,ref} \cdot \left(\frac{|\sigma_1| \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi}{p_{ref} \cdot \sin \varphi + c \cdot \cos \varphi} \right)^m \quad (3.49)$$

Из эмпирических исследований можно сделать вывод, что $E_{50, ref} \approx E_{s, ref}$.

Объемная пластическая деформация (объемное напряженное состояние)

Как и в других моделях пластичности материала, модель *GRAN* включает зависимость между пластическими сдвиговыми деформациями ϵ_p (расширение/увеличение в объеме) и соответствующими объемными пластическими деформациями $\epsilon_{p,v}$. Данная зависимость формируется следующим образом:

$$\dot{\epsilon}_{p,v} = \dot{\epsilon}_p \cdot \sin \psi_m \quad (3.50)$$

Для модели *GRAN* так называемый мобилизованный угол дилатансии ψ_m определяется по хорошо известному методу Роу (*Rowe*) [4] – график зависимости на рисунке 3.12 (см. п.п. 3.10.2 ‘Дилатансия’ данного руководства).

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cs}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cs}}, \quad (3.51)$$

В этом случае угол внутреннего трения критического состояния φ_{cs} характеризует переход между уплотненным состоянием (малые значения отношений между минимальными и максимальными напряжениями при $\varphi_m < \varphi_{cs}$) и дилатантным состоянием (более высокие значения отношений между минимальными и максимальными напряжениями при $\varphi_m > \varphi_{cs}$) грунта. Мобилизованный угол трения φ_m в уравнении 3.51 рассчитывается по следующей формуле:

$$\sin \varphi_m = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2c \cdot \cot \varphi - \sigma'_1 - \sigma'_3} \quad (3.52)$$

Разрушение материала происходит, когда $\varphi_m = \varphi$. Также разрушение происходит, когда угол дилатансии достигает своего максимального значения $\psi_m = \psi$. Учитывая данные условия, из уравнения 3.51 критический угол трения может быть рассчитан по формуле:

$$\sin \varphi_{cs} = \frac{\sin \varphi - \sin \psi}{1 - \sin \varphi \sin \psi} \quad (3.53)$$

ПК *SOFiSTiK* автоматически выполняет расчет угла внутреннего трения критического состояния φ_{cs} , исходя из максимальных значений угла внутреннего трения φ и угла дилатансии ψ , заданных пользователем.

Было обнаружено, что при определенных условиях, а именно при $\varphi_m < \varphi_{cs}$, метод Роу с учетом углов дилатансии, рассчитанных по формуле 3.51, не описывает с должной достоверностью реакцию грунта на действие нагрузки, а конкретнее, данная реакция несколько преувеличена. Во избежание данного несоответствия исследователи разработали модифицированные методики, которые основаны на оригинальном методе Роу. Некоторые из этих методов, которые реализованы в ПК *SOFiSTiK*, описаны ниже в руководстве.

Одним из методов, который не требует введения дополнительных параметров, является метод Серейде (*Søreide*) [15], который совершенствует метод Роу путем ввода поправочного коэффициента $\sin \varphi_m / \sin \varphi$ (рис.3.12).

$$\sin \psi_m = \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cs}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cs}} \cdot \frac{\sin \varphi_m}{\sin \varphi} . \quad (3.54)$$

Этот метод активируется командами модуля *TALPA/ASE*: *TALPA: CTRL MSTE EMAX 2*; *ASE: CTRL MSTE W4 2*.

Вейнерт (*Wehnert*) [6] предложил усовершенствовать метод Роу (уравнение 3.51) путем уменьшения критического значения параметра ψ_0 при малых значениях мобилизованного угла внутреннего трения (рис.3.12).

$$\sin \psi_m = \begin{cases} \sin \psi_0 & ; 0 < \psi_m \leq \psi_m^{Rowe} \\ \frac{\sin \varphi_m - \sin \varphi_{cs}}{1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_{cs}} & ; \psi_m^{Rowe} < \psi_m \leq \psi \end{cases} . \quad (3.55)$$

Для использования данного метода, характеризующего свойства дилатантности, требуется ввод дополнительного параметра ψ_0 . Команды модулей *TALPA/ASE*, а именно *TALPA: CTRL MSTE EMAX 1 EMIN ψ_0* или *ASE: CTRL MSTE W4 1 W5 ψ_0* , дезактивируют оригинальный метод Роу и активирует соответствующий метод Вейнерта [6].

Учет постоянного угла дилатансии $\psi_m \equiv \psi$, то есть деактивация отношения в уравнении 3.51, можно запросить, указав команду в модуле *TALPA CTRL MSTE EMAX 0* или в модуле *ASE CTRL MSTE W4 0* (рис. 3.12).

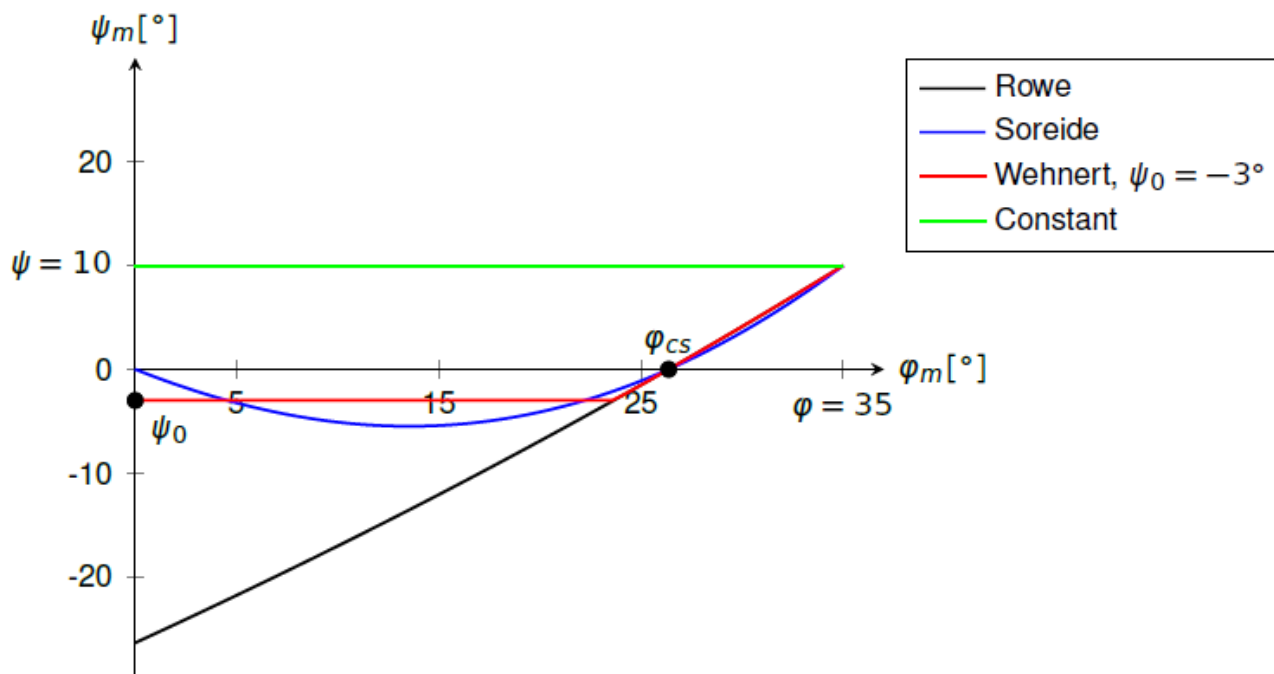


Рис. 3.13 – Сравнение методов расчета мобилизованного угла дилатансии ψ_m , реализованных в ПК *SOFiSTiK* при $\phi = 35^\circ$ и $\psi = 10^\circ$

Примечание

Следует отметить, что в водонасыщенных грунтах, находящихся в недренированных условиях, процесс изменения избыточного порового давления воды демонстрирует выраженную чувствительность данной фазы грунта к возникновению объемной деформации. Как следствие, при проведении соответствующих имитаций с использованием двухфазной модели следует тщательно выбирать параметры для ввода в систему дилатантного материала. В идеале значения данных параметров должны быть откалиброваны исходя из лабораторных испытаний материала.

Для получения дополнительной информации о влиянии различных методов моделирования системы на значения объемных деформаций грунта в недренированных условиях рекомендуем ознакомиться с методикой испытания

грунта «Консолидированное недренированное испытание уплотненных грунтов с фиксированной степенью влажности» (*Triaxial Consolidated Undrained (CU) Test*), файл с описанием которого расположен по следующему пути [VERIFICATION_MANUAL_MECHANICAL: BE48](#).

Нелинейные переменные состояния

- Распространение пластических деформаций (количество пластификаций)

Идентификатор текущего состояния материала от действия нагружения:

0	упругое состояние
+2	упрочнение в девиаторных направлениях
+4	объемное упрочнение
+8	разрушение материала (модель Кулона-Мора)

ПРИМЕР: На текущем этапе нагружения материальная точка подвергается упрочнению в обоих 'направлениях' и, в конечном итоге, разрушается. Соответствующее данному примеру значение идентификатора составляет $14 = 2 + 4 + 8$.

- Девиатор пластической деформации → п.п. 3.10.3
- Девиатор объемной деформации → п.п. 3.10.3
- Мобилизованный угол внутреннего трения φ_m

Позволяет определить степень сдвиговых деформаций на основе критерия Кулона-Мора. Вычисляется согласно уравнению (3.52).

- Коэффициент использования

Соотношение $u \equiv \varphi_m / \varphi_{inp}$, где φ_{inp} является максимальным (конечным) значением угла внутреннего трения, которое устанавливается пользователем для каждого материала.

- Напряжение в изотропном предварительно уплотненном образце грунта

Гидростатическое напряжение p_c , характеризующее наиболее сжатое состояние образца, которое возникает в системе на определенном этапе нагружения (график модели Мора-Кулона). Гидростатическое напряжение рассчитывается по формуле: $p \equiv (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$.

- Мобилизованный угол дилатансии ψ_m

Угол дилатансии, соответствующий текущему этапу нагружения. Рассчитывается при помощи уравнения (3.52) при условии, если активированы свойства дилатантности (теория дилатансии). В противном случае, данный параметр будет приравняться к общему значению угла дилатансии для данного материала: $\psi_m = \psi$.

Примечания

Рассматриваемая модель поведения грунта может быть легко откалибрована при помощи данных, полученных в результате трехосного/одометрического испытания – эмпирических исследований. Учитывая данную особенность, процесс деформации образца материала до момента его разрушения может быть смоделирован с достаточной точностью. В дополнение к этому пользователь может учесть специфические жесткости материала, рассчитываемые при первичном нагружении, а также при перегрузке и разгрузке расчетной системы. Результаты, полученные при использовании данной модели, преимущественно точны по сравнению с результатами, полученными при использовании классических упругопластических моделей грунта. Следовательно, модуль *GRAN* особенно подходит для задач, требующих более точных расчетов.

Если же эмпирические данные отсутствуют, то для приближения свойств нормально уплотненного грунта к реальным значениям обычно используют следующее:

$$\rho_{ref} = 100 \text{ kPa} \quad (3.56a)$$

$$m \simeq 0.4 \dots 0.7 \quad (3.56b)$$

$$R_f \simeq 0.7 \dots 0.9 \quad (3.56c)$$

$$E_{50,ref} \approx E_{s,ref} \quad (3.56d)$$

$$E_{ur,ref} \simeq 3 \cdot E_{50,ref} \quad (3.56e)$$

При использовании модели *GRAN* значение коэффициента Пуассона *MUE* (*MAT/MATE*) следует выбирать только для имитации упругой реакции грунта при его нагружении (например, разгрузка, перегрузка). Фактическое изменение значений поперечных напряжений при первичном нагружении контролируется самой моделью *GRAN*. Поэтому, в отличие от обычных моделей, описывающих поведение идеально-упругого-пластического материала, в которых калибровка при первичном нагружении часто приводит к значениям $MUE \gg 0,3$, в модели *GRAN* подходящие значения *MUE* значительно ниже, обычно в диапазоне от 0,2 до 0,3. При более высоких значениях *MUE* значения объемных деформаций могут быть преувеличены (это также может быть связано с функциональными особенностями самой модели).

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [16], [17], [13], [18] и [14] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.8 SWEL – Набухание грунтов

Область применения

В систему вводятся дополнительные параметры для учета набухания грунтов, возникающего в результате нарушения напряженного состояния (разуплотнение грунта при снятии нагрузки).

Используемые характеристики:

<i>SWEL</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Модуль набухания K_q	[‰] ₁₀₈₁	3.30
<i>P2</i>	Предельное напряжение при набухании (абсолютное значение) $ \sigma_c > 0$ (величина наименьшего сжимающего напряжения, ниже которого не происходит дальнейшего увеличения объема грунта – набухания)	[кН/м ²] ₁₀₈₉	10.00
<i>P3</i>	Равновесное напряжение при набухании (абсолютное значение), полученное из результатов одометрического испытания $ \sigma_{o,hist} > \sigma_c $	[кН/м ²] ₁₀₈₉	2000.00
<i>P4</i>	Увеличение объема во времени – <i>Viscous extension</i> : продолжительность по времени $\eta \geq 0,00$	<i>h</i>	0.00

Взаимосвязь между напряжениями и деформациями, возникающими при набухании грунта, на конечном этапе выражена в виде формулы:

$$\varepsilon_{i\infty}^q = -p_1 \cdot \begin{cases} 0 & \sigma_i < \sigma_{0i} \\ \log_{10} \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{0i}} \right) & \sigma_{0i} \leq \sigma_i \leq -p_2 \\ \log_{10} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{0i}} \right) & -p_2 < \sigma_i \end{cases} \quad (3.57)$$

где, $i = 1 \dots 3$;

σ_i – главные нормальные напряжения;

σ_{0i} – равновесное напряженное состояние при набухании (начальное состояние), преобразованное в направлении главного нормального напряжения σ_i .

Примечания

Набухание грунтов – это сложное явление, на которое влияют различные факторы. Существует два механизма набухания, имеющих практическое значение, которые необходимо различить. Для обоих процессов наличие воды в порах грунта является общей предпосылкой для возникновения пучения. Первый механизм называется «осмотическим набуханием» глинистых минералов, которое в основном инициируется под действием разгрузки глинистых осадочных пород. Второй механизм имеет место в насыщенных сульфатом породах с содержанием ангидрида. В этом случае эффект набухания обусловлен химическим превращением ангидрида в гипс, который сопровождается большим увеличением объема (61%).

В обоих случаях (механизмах набухания) была установлена основная зависимость между увеличением объема грунта, вызванным его набуханием, и напряженным состоянием, как в лабораторных, так и в натурных экспериментах. Используемая формула представляет собой обобщенное одномерное соотношение между напряжениями и деформациями конечного состояния грунта, полученное в результате испытания грунта на набухание Хадера-Амберга (*Huder-Amberg swelling test*). Здесь не учитывается зависимость изменения объема грунта по времени.

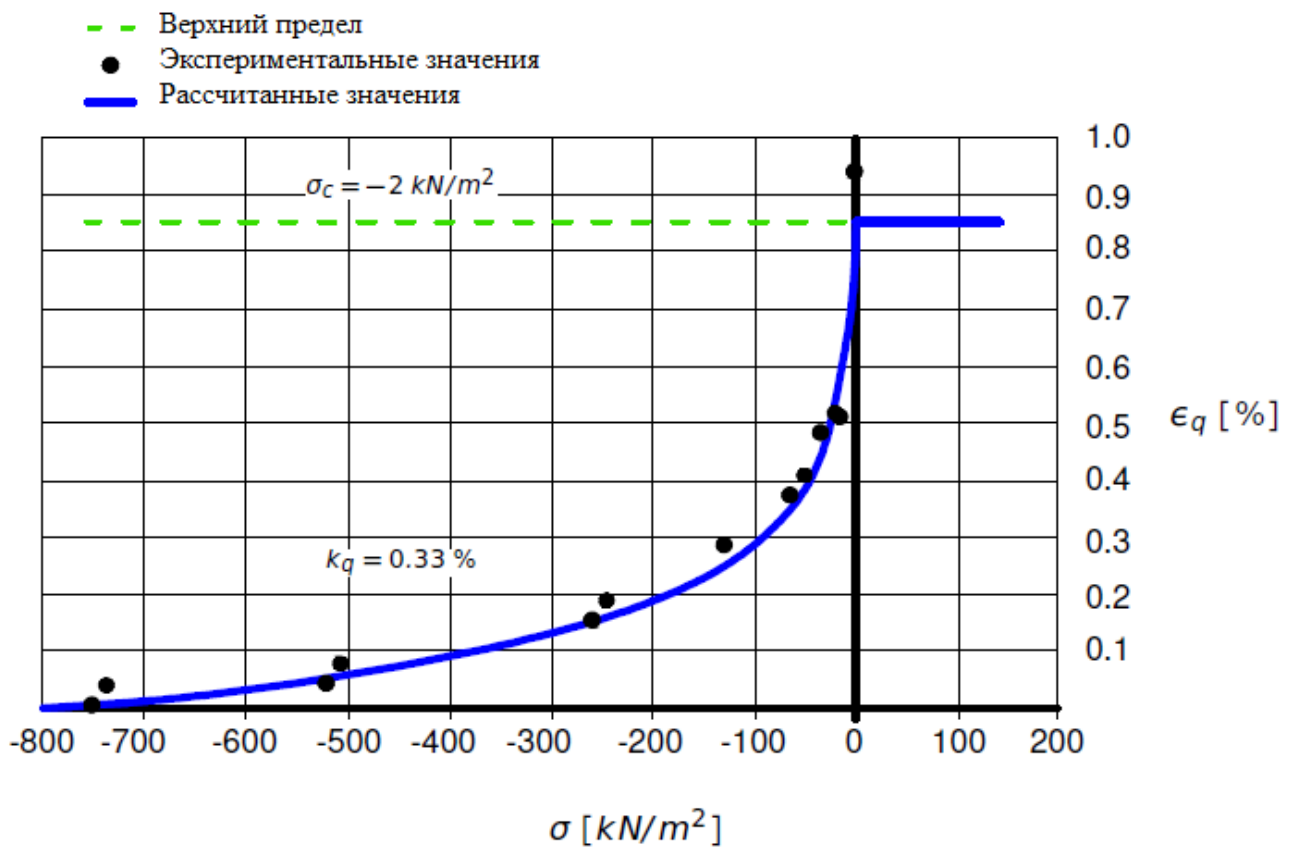


Рис. 3.14 – Графическое представление процесса набухания грунта

Равновесное напряженное состояние относительно равновесного напряженного состояния при набухании σ_0 задается в системе при помощи команды *GRP*. Для этого используется функция *PLQ*, чтобы сослаться на (ранее просчитанный) случай нагружения, как на «первичное состояние при набухании». Это состояние расчетной системы рассматривается как равновесное состояние по отношению к уже набухшему состоянию (натурное состояние грунтового массива до начала строительных работ). То есть приращения деформаций набухания, вызванные возможной «разгрузкой» предыдущего равновесного состояния $\sigma_{0, hist}$ к этому новому «первичному состоянию» σ_0 уже произошли. Приращения деформаций набухания в процессе строительных работ обусловлены только разгрузкой нового "первичного состояния при набухании" σ_0 :

$$\begin{aligned}
(\Delta) \varepsilon_{i\infty}^q &= \varepsilon_{i,tot}^q - \varepsilon_{i,hist}^q \\
&= \left\{ -p_1 \cdot \log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,hist}}\right) \right\} - \left\{ -p_1 \cdot \log\left(\frac{\sigma_{0i}}{\sigma_{0,hist}}\right) \right\} \\
&= -p_1 \cdot \log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{0i}}\right)
\end{aligned}
\tag{3.58}$$

Упомянутое выше уравнение материала ограничено его конечным (стационарным) состоянием, то есть оно характеризует зависимость деформаций пучения и напряженного состояния, которое наблюдается в момент времени $t = \infty$. Чтобы рассмотреть реакцию (поведение) грунтового массива во времени, необходимо распределить данную зависимость вдоль временной шкалы при помощи соответствующего метода – *P4 (Viscous extension)*. Учитывая это, скорость увеличения деформаций набухания определяется по формуле:

$$\dot{\varepsilon}^q = \frac{\varepsilon_{\infty}^q(\sigma) - \varepsilon^q}{\eta}
\tag{3.59}$$

Где учтены параметр запаздывания по времени η как характеристика вязкости и ε^q , которая обозначает при набухании, которая развивается в момент рассматриваемого времени t . Используя реологические термины, данный подход может быть интерпретирован как параллельное взаимодействие процесса «набухания» и устройства для его предотвращения (гашения).

Реакция грунта во времени может быть откалибрована при помощи параметра η (*P4*) – чем больше значение η , тем медленнее происходит развитие деформаций в грунте при набухании. При $\eta = 0$ реакция грунта мгновенна, что идентично идеально текучему состоянию материала (неподвижное состояние/состояние равновесия). Кроме того, при $t \rightarrow \infty$ расчет реакции системы сводится к определению ее состояния равновесия, которое не зависит от значения параметра η . Это свойство позволяет применять вязкую модель грунта для стабилизации процесса поиска решения, даже если нет явной необходимости в моделировании каких-либо процессов во времени.

Команда *SWEL* также может быть использована для задания линейно-упругих или упругопластических свойств материала основания.

Учет свойств анизотропии при использовании данной модели невозможен.

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [19], [20], [21], [22] и [9] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.9 FAUL – Ориентированные плоскости сдвига

Область применения

Данная модель используется для ввода в расчетную систему ориентированных плоскостей сдвига, а также для учета анизотропных упругопластических свойств материала.

Используемые характеристики:

<i>FAUL</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Угол внутреннего трения φ_s плоскости сдвига	[°]	!
<i>P2</i>	Прочность сцепления (когезия) c_s плоскости сдвига	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P3</i>	Предел прочности на растяжение $f_{tu, s}$ плоскости сдвига	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0.00
<i>P4</i>	Угол дилатансии ψ_c плоскости сдвига	[°]	0.00
<i>P5</i>	Меридианный угол (угол наклона) плоскости сдвига (<i>OAL</i>)	[°]	0.00
<i>P6</i>	Угол падения плоскости сдвига (<i>OAF</i>)	[°]	0.00
<i>P9</i>	Энергия разрушения при растяжении G_f	[кНм/м ²]	0.00

Напряжение сдвига, возникающее в обозначенной плоскости сдвига, и соответствующие этому напряжению пластические деформации контролируются при помощи параметров f_1 (условие текучести материала) и g_1 (условие пластического течения материала), рассчитываемых по формулам:

$$f_1 = \tan \varphi_s \cdot \sigma - c_s + \tau \leq 0 \quad (3.60a)$$

$$g_1 = \tan \psi_s \cdot \sigma + \tau \quad (3.60b)$$

где, σ – нормальное напряжение, действующее в плоскости сдвига;

τ – максимальное напряжение сдвига, действующее в направлении плоскости сдвига.

Предел прочности при растяжении вдоль нормали к плоскости ограничен дополнительным предельным значением, которое рассчитывается по формуле:

$$f_2 = \sigma - f_{tu,s} \leq 0 \quad (3.61)$$

где, σ – нормальное напряжение, действующее в плоскости сдвига.

Нелинейные переменные состояния

Переменная упрочнения в плоскости сдвига: пластическая девиаторная деформация в плоскости раскола/трещины.

Примечания

Данная модель, используемая для учета определенных свойств материала, может быть использована до трех раз, как дополнение к уже рассмотренным моделям поведения грунта (*elastic*, *MOHR*, *DRUC*). Это позволяет учитывать различные направления разломов в массиве. Увеличение числа заданных плоскостей сдвига в материале также увеличивает количество возможных состояний равновесия для материальной точки, что может повлиять на стабильность процесса итерации для определения общего состояния равновесия системы.

Для определения значений меридианного угла OAL и угла падения OAF плоскости сдвига необходимо ознакомиться с инструкцией, приведенной в п.п. 3.7 MAT/3.8 MATE. Для плоских систем значение OAL непосредственно определяет угол заложения слоев, то есть угол между локальным направлением оси x и глобальным направлением оси X . В плоских системах параметр OAF не используется.

При $P9 > 0$ применяется скалярная модель повреждений с учетом экспоненциального закона потери прочности материала при растяжении. Процесс разупрочнения можно описать следующей формулой:

$$f_{t,s} = f_{tu,s} \cdot \exp\left\{ - w \cdot \frac{f_{tu,s}}{G_f} \right\} \quad (3.62)$$

где, w – ширина раскрытия трещины.

В этом контексте энергия разрушения при растяжении G_f является объективной характеристикой материала. Чтобы свести к минимуму влияние побочных явлений, зависящих от разбиения системы на конечные элементы, в состав формулы разупрочнения включен размер соответствующего элемента. Однако, это требует достаточно точного разбиения расчетной системы на конечные элементы в соответствующих областях.

В случае, когда $P9 = 0$, предельное значение прочности при растяжении плоскости сдвига определяется исходя из значения параметра $f_{tu,s}$ без учета разупрочнения.

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [8] и [9] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.10 ROCK – Материал с ориентированной плоскостью сдвига

Область применения

Данная модель используется для учета анизотропных упругопластических свойств материала с ориентированной плоскостью сдвига.

Используемые характеристики:

ROCK	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Угол внутреннего трения φ_s плоскости сдвига	[°]	!
<i>P2</i>	Прочность сцепления (когезия) c_s плоскости сдвига	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P3</i>	Предел прочности на растяжение $f_{tu, s}$ плоскости сдвига	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0.00
<i>P4</i>	Угол дилатансии ψ_c плоскости сдвига	[°]	0.00
<i>P5</i>	Угол наклона плоскости сдвига α относительно оси x (0°-180°)	[°]	0.00
<i>P6</i>	Угол внутреннего трения φ_r породы/грунта	[°]	!
<i>P7</i>	Прочность сцепления (когезия) c_r породы/грунта	[кН/м ²] ₁₀₈₉	!
<i>P8</i>	Предел прочности на растяжение $f_{t, r}$ породы/грунта	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0.00
<i>P9</i>	Угол дилатансии ψ_r породы/грунта	[°]	0.00

Плоскость сдвига:

$$f_{s1} = \tan(p1) \cdot \sigma - p2 + \tau \leq 0 \quad (3.63a)$$

$$g_{s1} = \tan(p4) \cdot \sigma + \tau \quad (3.63b)$$

$$f_{s2} = \sigma - p3 \leq 0 \quad (3.63c)$$

где, σ – нормальное напряжение, действующее в плоскости сдвига;

τ – максимальное напряжение сдвига, действующее в направлении плоскости сдвига.

Скальный грунт/порода (модель Мора-Кулона):

$$f_r = \frac{1}{3}I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{\sin \theta \sin \varphi}{\sqrt{3}} \right) - c \cos \varphi \leq 0 \quad (3.64a)$$

$$g_r = \frac{2 \sin \psi}{\sqrt{3}} (3 \pm \sin \psi) \cdot I_1 + \sqrt{J_2} \quad (3.64b)$$

Примечания

Данная модель позволяет определить прочность породы/грунта, а также сдвиговую прочность преобладающей плоскости сдвига, которая характеризуется углом $P5$ (по умолчанию, как анизотропный материал). Если значение $P1$ отличается от $P4$, то соответствующий закон течения пластического разрушения будет принят неассоциированным.

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [8] и [9] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.11 UNDR – Обводненные грунты

Если нет возможности для отвода воды из пор грунта (если граница раздела грунтов выполнена из водонепроницаемого материала или, если скорость притока воды настолько высока, а проницаемость грунта настолько мала, что отток воды пренебрежимо мал), то консолидации грунта не происходит. В этом случае реакция грунта соответствует реакции преимущественно обводненного материала, и, следовательно, применима теория анализа напряжений в не дренированном состоянии.

Область применения

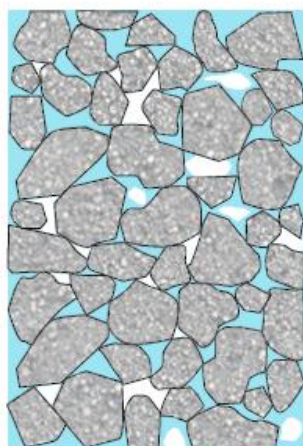
Данная модель используется для ввода в расчетную систему грунтов, насыщенных водой с низкой проницаемостью и высокой скоростью притока воды, а также, когда необходимо проанализировать кратковременную реакцию грунтового массива.

Используемые характеристики:

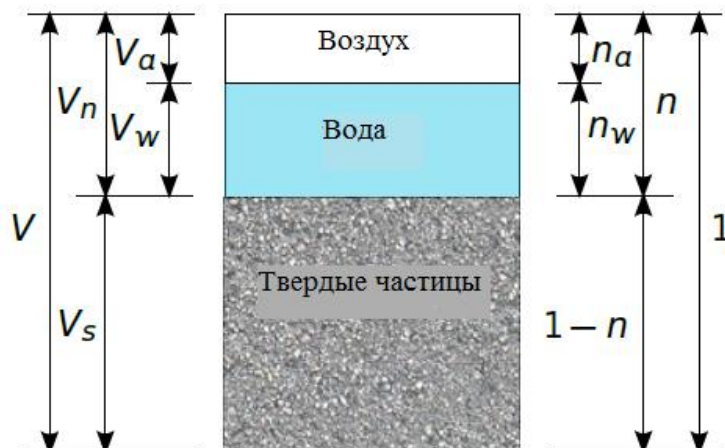
UNDR	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>PI</i>	<i>B</i> – параметр Скемптона (<i>Skempton's B-parameter</i>) Пределы значения <i>B</i> : $0.909 \leq B \leq 0.998$	-	0.978

Обводненные грунты

Грунт представляет собой пористый материал, состоящий из твердых частиц, которые вместе составляют его скелет – скелет грунта. Поры могут быть заполнены как жидкостью (обычно водой), так и воздухом. Учитывая данную особенность, необходимо говорить о грунте, как о трехфазной системе (рис. 3.15).



(a) Элемент грунтового массива



(b) Объем и пористость

Рис. 3.15 – Грунт как трехфазная система

Твердые частицы занимают объем V_s . Важным основным параметром грунта является пористость n , которая определяется как отношение объема пор V_n к общему объему грунта V (рис. 3.15b), т. е.

$$n = \frac{V_n}{V} . \quad (3.65)$$

Как было указано ранее, часть объема пор обычно занята водой V_w в то же время остальной объем заполнен воздухом V_a . Когда объем воздуха в порах приближается к нулевому значению – когда $V_a \rightarrow 0$, вода полностью занимает поровое пространство ($V_n = V_w$), принято говорить, что грунт полностью¹ насыщен водой – водонасыщенный грунт. В дальнейшем мы будем использовать данный термин, если не будут внесены другие условия.

Рассмотрим образец грунта, насыщенный водой и подвергшийся какой-то внешней общей нагрузке P , действующей на плоскость площадью A (рис. 3.16). Эти внешние нагрузки являются причиной возникновения порового давления воды p_w и напряжений в частицах грунта. Напряжения в частицах являются результатом действия сосредоточенных нагрузок, возникающих в точках контакта между частицами грунта и водой, которая окружает данные частицы и оказывает

¹ Как будет указано ниже, полное насыщение водой при условии $V_a = 0$ рассматривается только в рамках теоретических исследований, что никак не соответствует натуральным условиям. Когда мы используем термин полностью насыщенный грунт, то его следует воспринимать как квазинасыщенный грунт.

на них определенное давление (рис. 3.16а). Предположив, что жесткость отдельных частиц грунта намного выше, чем жесткость всего его скелета в целом, можно сделать вывод, что образец грунта может деформироваться только при скольжении и прокручивании данных частиц в точках контакта между ними. Следовательно, степень деформации скелета грунта зависит исключительно от сосредоточенных нагрузок, действующих в точках контакта между отдельно взятыми частицами.

Учитывая данную особенность, через образец грунта можно провести плоскость $s-s$, которая пересекала бы точки контакта между частицами грунта (рис. 3.16а).

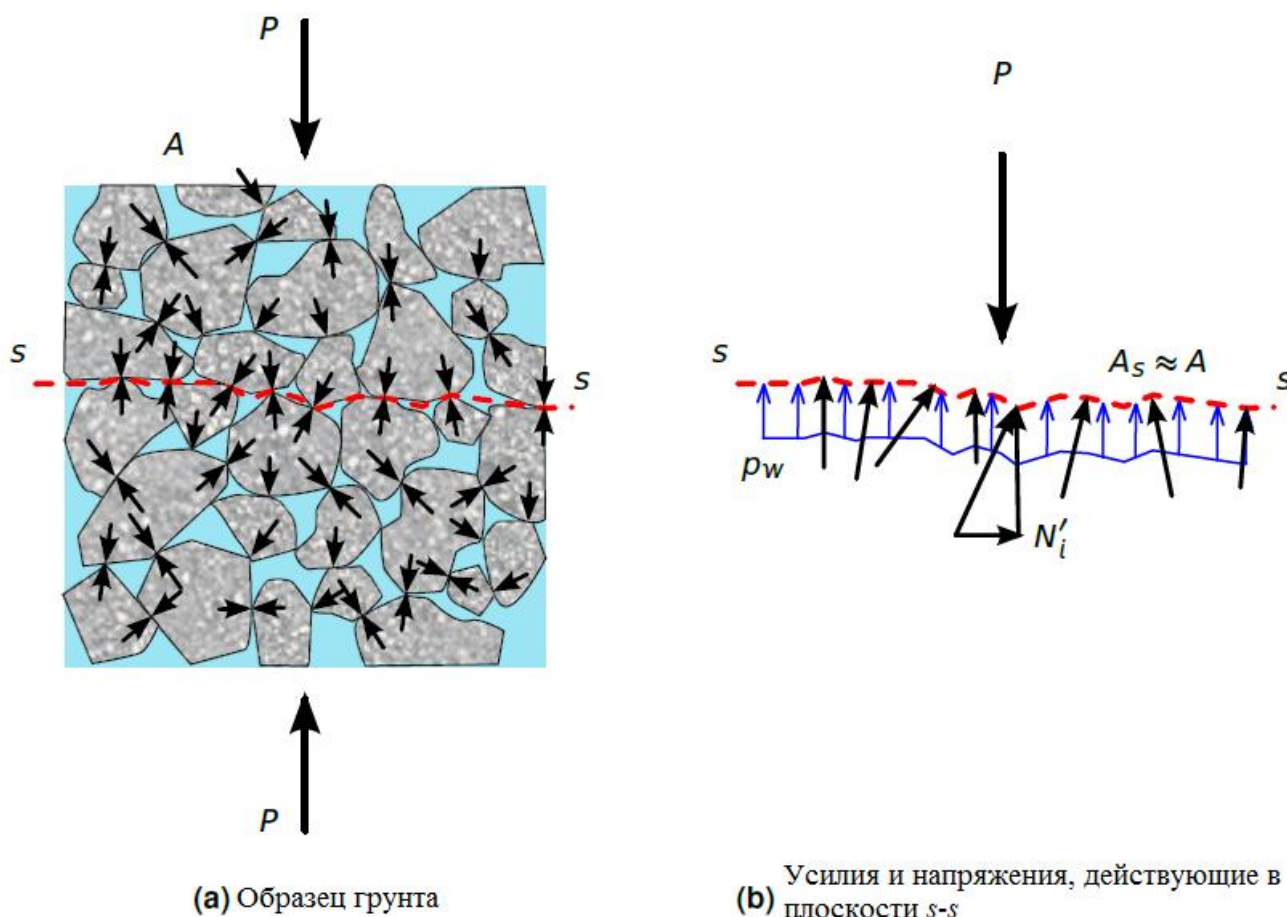


Рис. 3.16 – Принцип эффективных напряжений

Из-за относительно небольшого размера частиц грунта поверхность $s-s$ не сильно отличается от плоскости площадью A_s , которая приблизительно равна A . Контактные силы, действующие в плоскости $s-s$, могут быть разложены на

составляющие, а именно на тангенциальную и нормальную составляющую N_i , действующие в направлении силы P . Предполагая, что зоны контакта между частицами грунта являются точками (их площадь пренебрежимо мала по сравнению с A), поровое давление воды p_w будет также действовать в плоскости $s-s$ по всей ее площади $A_s \approx A$. Теперь мы можем написать уравнения равновесия для плоскости $s-s$ в вертикальном направлении (рис. 3.16b) следующим образом:

$$P = \sum_i N'_i + p_w \cdot A . \quad (3.66)$$

Разделив уравнение 3.66 на площадь A , а параметры N'_i и P заменить на $\sigma = P/A$ и $\sigma' = \sum_i N'_i/A$ получаем следующее уравнение:

$$\sigma = \sigma' + p_w . \quad (3.67)$$

Уравнение 3.67 характеризует один из основополагающих принципов механики грунтов, сформулированным Карлом Терцаги (*Karl Terzaghi*) – принципом эффективных напряжений. Этот принцип гласит, что полное нормальное напряжение σ включает в себя эффективное нормальное напряжение σ' и поровое давление воды p_w . Эффективное нормальное напряжение σ' является мерой контактных сил между частицами материала и, следовательно, в соответствии с изложенными выше предположениями оно регулирует степень деформации грунтов.

Примечание

Принцип эффективного напряжения Терцаги основан на трех основных предположениях:

1. Грунт насыщен водой
2. Частицы грунта в значительной степени более жесткие по сравнению с грунтом в целом
3. Зоны контакта между частицами грунта очень малы

Для стандартного водонасыщенного грунта эти предположения действительны; однако, для скального грунта некоторые из этих предположений могут не выполняться. В этом случае необходимо учитывать сжимаемость породы и, следовательно, уравнение 3.67 следует изменить, чтобы можно было учесть данную особенность грунта.

Принцип Терцаги, обобщенный для трехмерного объекта, гласит: общие нормальные напряжения в насыщенном водой грунте состоят из двух частей: эффективных нормальных напряжений и порового давления (воды или другой жидкости) [23]. Эффективные напряжения сдвига равны общим напряжениям сдвига, так как сопротивление воды (жидкости) в порах к сдвигу является несущественным. Это можно описать следующими уравнениями:

$$\sigma_i = \sigma'_i + p_w \quad , \quad i = \{x, y, z\} \quad (3.68a)$$

$$\tau_{jk} = \tau'_{jk} \quad , \quad j, k = \{x, y, z\} \quad , \quad j \neq k \quad (3.68b)$$

где, σ, τ – общие нормальные и сдвиговые напряжения;

σ', τ' – эффективные нормальные и сдвиговые напряжения;

p_w – напряжение поровой воды или жидкости (отрицательно при абсорбции).

Переписав уравнения 3.68 в матричную форму, можно выразить формулу увеличения суммарного напряжения (шаг увеличения):

$$\Delta \boldsymbol{\sigma} = \Delta \boldsymbol{\sigma}' + \Delta \boldsymbol{\sigma}_w \quad , \quad (3.69)$$

где,

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}' = \left[\begin{array}{cccccc} \Delta \sigma'_x & \Delta \sigma'_y & \Delta \sigma'_z & \Delta \tau_{xy} & \Delta \tau_{xz} & \Delta \tau_{yz} \end{array} \right]^T \quad , \quad (3.70a)$$

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}_w = \left[\begin{array}{cccccc} \Delta p_w & \Delta p_w & \Delta p_w & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]^T \quad . \quad (3.70b)$$

Увеличение эффективного напряжения определяется по формуле:

$$\Delta \boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{D}' \cdot \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \quad , \quad (3.71)$$

где, \mathbf{D}' – матрица упругости скелета грунта (см. п.п. 3.8 *MATE*).

Поровое давление воды в грунте состоит из двух частей: устойчивого давления в порах p_{ws} и избыточного давления в порах p_{we} :

$$p_w = p_{ws} + p_{we} \quad . \quad (3.72)$$

Скорость изменения устойчивой части порового давления воды Δp_{ws} равна нулю, следовательно, скорость изменения порового давления Δp_w равна скорости изменения избыточного порового давления Δp_{we} , т.е.:

$$\Delta p_w = \Delta p_{we} \quad . \quad (3.73)$$

В обводненных условиях относительные перемещения между водой (жидкостью) и скелетом грунта незначительно, и поэтому деформации, возникающие в грунте, одинаковы на каждой его фазе. Следовательно, формула увеличения напряжения от действия порового давления воды в грунте будет иметь следующий вид:

$$\Delta \sigma_w = \mathbf{D}_w \cdot \Delta \boldsymbol{\varepsilon} , \quad (3.74)$$

В формуле 3.74 параметр \mathbf{D}_w характеризует матрицу жесткости воды (жидкости) в порах грунта, которая имеет следующий вид:

$$\mathbf{D}_w = K_e \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} . \quad (3.75)$$

Параметр K_e является величиной константой и эквивалентом объемного модуля упругости воды (жидкости), содержащейся в порах грунта. Подставив уравнение 3.75 в 3.74, и учитывая условия, представленные в виде уравнений 3.70b и 3.76, можно получить уравнение, описывающее зависимость между скоростью изменения избыточного давления воды в порах грунта Δp_{we} и скоростью изменения (роста) объемной деформации $\Delta \varepsilon_v$:

$$\Delta p_{we} = K_e \cdot (\Delta \varepsilon_x + \Delta \varepsilon_y + \Delta \varepsilon_z) = K_e \cdot \Delta \varepsilon_v . \quad (3.76)$$

Модуль K_e связан с объемным модулем упругости воды (жидкости) K_w , содержащейся в порах грунта. Эта связь описывается следующим образом.

В элементарном объеме V насыщенного водой грунта – отсутствует водоотвод (дренаж), вода в порах грунта занимает объем $V_w = n \cdot V$, а твердые частицы грунта занимают объем $V_s = (1 - n) \cdot V$, где n – пористость (рис. 3.15). Полное изменение объема в грунте ΔV включает изменение объема частиц самого грунта ΔV_s и изменение объема воды в порах грунта ΔV_w , т.е.

$$\Delta V = \Delta V_s + \Delta V_w . \quad (3.77)$$

Так как частицы грунта считаются несжимаемыми ($\Delta V_s \approx 0$), изменение объема V может происходить только за счет изменения объема пор. Поскольку грунт насыщен водой и отсутствует отвод воды (дренаж), изменение объема пор возможно только в том случае, если изменится объем воды, находящейся в порах грунта. Учитывая это, а также разделив уравнение 3.77 на V , общее изменение объема на единицу объема самого грунта $\Delta \varepsilon_v$ характеризуется следующим уравнением:

$$\Delta \varepsilon_v \approx \frac{\Delta V_w}{V} = \frac{\Delta V_w}{V_w} \cdot n. \quad (3.78)$$

Изменение объема воды, содержащейся в порах грунта, на единицу площади ($\Delta V_w / V_w$) прямо пропорционально изменению избыточного давления воды в порах грунта Δp_{we} и обратно пропорционально объемному модулю упругости воды K_w , содержащейся в порах. Учитывая это, значение объемной деформации грунта может быть выражено при помощи следующего уравнения:

$$\Delta \varepsilon_v \approx \frac{\Delta p_{we}}{K_w} \cdot n. \quad (3.79)$$

Проанализировав уравнения 3.76 и 3.79, Поттсом и Здравковичем (*Potts & Zdravkovic*) была установлена зависимость между эквивалентным объемным модулем упругости воды K_e и ее объемным модулем упругости K_w [24]:

$$K_e \approx \frac{K_w}{n}. \quad (3.80)$$

Принцип эффективных напряжений, описанный уравнением 3.69, может быть сформулирован через изотропные напряжения $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ и уравнения 3.71 и 3.74:

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p_{we} = K' \Delta \varepsilon_v + \frac{K_w}{n} \Delta \varepsilon_v \quad \Rightarrow \quad K_u = K' + \frac{K_w}{n}, \quad (3.81)$$

где, $K' = \Delta p' / \Delta \varepsilon_v$ – объемный модуль упругости скелета грунта;

$K_u = \Delta p / \Delta \varepsilon_v$ – объемный модуль упругости обводненного грунта (отсутствие водоотвода).

Эквивалентная объемная жесткость воды K_w/n , содержащейся в порах грунта, может характеризоваться объемным модулем упругости скелета грунта K' и параметром Скемптона (B), что удобно, поскольку значение параметра Скемптона можно определить экспериментально при помощи не дренированного испытания при трехосном сжатии грунта. Именно по этой причине параметр Скемптона (B) выбирается в качестве вводного параметра (параметр $P1$) для моделирования свойств обводненного материала².

При недренированном трехосном испытании, в котором образец грунта подвергается изотропному сжатию ($\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$), параметр Скемптона (B) представляет собой взаимосвязь между изменением порового давления Δp_w и изменением общего изотропного напряжения $\Delta p = (\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)/3$, т.е.:

$$\Delta p_w = \Delta p_{we} = B \cdot \Delta p . \quad (3.82)$$

При сочетании уравнений 3.82 и 3.81, можно, наконец, получить зависимость между эквивалентным объемным модулем упругости воды, содержащейся в порах грунта, и объемным модулем упругости скелета грунта K' с учетом параметра Скемптона³.

$$K_e = \frac{K_w}{n} = \frac{B}{1-B} \cdot K' . \quad (3.83)$$

Теоретически, для грунтов, полностью насыщенных водой, параметр K_w равен объемному модулю упругости чистой воды K_w^0 . Во многих научных направлениях вода рассматривается, как несжимаемая жидкость ($K_w^0 = \infty$), что позволяет сделать предположение о том, что водонасыщенный грунт также является несжимаемым ($K_u = \infty$). Данное условие характеризуется параметром $B = 1$, что также является верхним предельным значением для параметра Скемптона (B). Это предельное значение, характеризующее несжимаемость воды в порах ($K_w/n \rightarrow \infty$, когда $B \rightarrow 1$, см. уравнение 3.83) и водонасыщенный грунт, не

²Скемптон [25] выразил изменение избыточного порового давления Δp_{we} , возникающее при изменениях общих главных напряжений $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_3$, уравнением: $\Delta p_{we} = B \cdot [\Delta\sigma_3 + A \cdot (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$. Скемптон называл коэффициенты A и B «коэффициентами порового давления», также известные как «коэффициенты Скемптона A и B ».

³ $K_w/n = B \cdot K_u$

может быть достигнуто при конечно-элементном расчете из-за особенности матрицы жесткости, которая позднее влияет на результат расчета.

Однако абсолютная несжимаемость воды невозможна в природе – вода имеет очень большой, но все же конечный объемный модуль упругости $K_w^0 = 2 \cdot 10^6$ кН/м², и, следовательно, объемная жесткость воды, содержащейся в порах грунта, K_w/n всегда конечна, даже если грунт полностью насыщен водой. Из этого следует, что параметр Скемптона (B) в реальных условиях всегда меньше единицы.

Примечание

Более того, полное насыщение грунта водой в действительности также невозможно. Практически невозможно полностью вытеснить весь объем поры V_a из всего объема грунта, поскольку «жесткость» воздуха значительно меньше объемной жесткости чистой воды K_w^0 , даже очень небольшая доля остаточного объема поры имеет существенное влияние на расчетную систему. Результирующий эквивалентный объемный модуль упругости воды (жидкости) K_w/n , содержащейся в порах грунта, характеризует очень высокую чувствительность в зависимости от степени водного насыщения грунта $S = V_w/V_n$. Данное отношение можно выразить следующим образом (*Arnold Verruijt* [26]):

$$\frac{1}{K_w} = \frac{S}{K_w^0} + \frac{1-S}{p_0} \quad \rightarrow \quad K_e = \frac{K_w}{n} = \frac{K_w^0 \cdot p_0}{(1-S) \cdot K_w^0 + S \cdot p_0} \cdot \frac{1}{n}, \quad (3.84)$$

где, p_0 – абсолютное давление воды, рассматриваемое относительно вакуума ($p_0 = 100$ кН/м²).

Для примера: несмотря на почти полное водонасыщение грунта на 99,9%, то есть $S = 0,999$, значение отношения $K_w^0/K_w \approx 20$, полученного из первой части уравнения 3.84, указывает на то, что сжимаемость воды в порах примерно в 20 раз выше, чем у чистой воды!

Чтобы избежать возможных проблем, связанных с очень высокими значениями жесткости при конечно-элементных расчетах FE , в программе используются следующие верхние границы:

$$\frac{K_w/n}{K'} \leq 500 \quad \Rightarrow \quad B \leq \frac{500}{501} \approx 0.998. \quad (3.85)$$

С другой стороны, для того, чтобы получить результаты, которые были бы максимально приближены к действительности ($B \approx 1$), жесткость поровой воды K_w/n должна быть существенно больше, чем жесткость скелета грунта K' . Учитывая данное условие, в программе используются следующие нижние границы:

$$\frac{K_w/n}{K'} \geq 10 \quad \Rightarrow \quad B \geq \frac{10}{11} \approx 0.909. \quad (3.86)$$

По умолчанию для объемной жесткости поровой воды и параметра Скемптона (B) устанавливаются следующие значения:

$$\frac{K_w/n}{K'} = 45 \quad \Rightarrow \quad B = \frac{45}{46} \approx 0.978. \quad (3.87)$$

Очень часто значение жесткости поровой воды K_w/n выражается через недренированный коэффициент Пуассона ν_u , объемного модуль упругости скелета грунта K' и эффективный коэффициент Пуассона ν' .⁴

$$\frac{K_w}{n} = \frac{3(\nu_u - \nu')}{(1 - 2\nu_u)(1 + \nu')} \cdot K'. \quad (3.88)$$

Из уравнений 3.88 и 3.83 следует, что значения недренированного коэффициента Пуассона и параметра Скемптона (B) не зависят друг от друга. Они связаны между собой следующими уравнениями:

$$\nu_u = \frac{3\nu' + B(1 - 2\nu')}{3 - B(1 - 2\nu')} \quad \Leftrightarrow \quad B = \frac{3(\nu_u - \nu')}{(1 + \nu_u)(1 - 2\nu')}. \quad (3.89)$$

Абсолютной несжимаемости водонасыщенных грунтов, характеризуемых параметром Скемптона $B = 1$, соответствует значение параметра $\nu_u = 0.50$.

⁴ $E_u = G \cdot (1 + \nu_u)$, $K_u = E_u / [3 \cdot (1 - 2\nu_u)]$.

Как известно, объемная жесткость поровой воды K_w/n также является матрицей жесткости поровой воды D_w , а значение приращения общего напряжения может быть выражено через деформации:

$$\Delta\sigma = (D' + D_w) \cdot \Delta\varepsilon . \quad (3.90)$$

3.10.12 LADE – Свойства упругопластического материала

Данная модель используется для ввода в систему свойств упругопластического материала не связанных с текучестью.

Область применения

Данная модель позволяет создать в системе все материалы с трением, включая скальные породы и бетон (модуль ASE, трехмерные массивные элементы – грунтовые массивы (*3D solid elements*))

Используемые характеристики:

<i>LADE</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Параметр η_1	-	!
<i>P2</i>	Экспонента m	-	!
<i>P3</i>	Прочность при одноосном растяжении f_t	[кН/м ²]	0.00
<i>P4</i>	Параметр η_2 для учета текучести	-	P1/10
<i>P5</i>	Прочность на сжатие	[кН/м ²]	-
<i>P6</i>	Разрушение при растяжении ε_{tu}	[‰]	-

$$f = I_1^3 - \left[27 + \eta_1 \cdot \left(\frac{p_a}{I_1} \right)^m \right] \cdot I_3 \leq 0 \quad (3.91a)$$

$$g = I_1^3 - \left[27 + \eta_2 \cdot \left(\frac{p_a}{I_1} \right)^m \right] \cdot I_3 \quad (3.91b)$$

где, $p_a = 103.32 \text{ кН/м}^2$ – атмосферное давление воздуха;

$$I_1 = -(\sigma_1 - P_3) - (\sigma_2 - P_3) - (\sigma_3 - P_3);$$

$$I_3 = -(\sigma_1 - P_3) \cdot (\sigma_2 - P_3) \cdot (\sigma_3 - P_3).$$

Примечания

Из-за их нефизического характера калибровка параметров модели *LADÉ* может вызвать некие трудности при первом использовании. По этой причине основной метод калибровки материала с известными значениями прочности при одноосном растяжении и сжатии (например, бетон) описан ниже более подробно. Особый интерес представляет сечение трехмерной поверхности текучести вместе с одной из главных плоскостей (\rightarrow «кривая Купфера»/«*Kupfer curve*»).

Параметр m (экспонента) влияет на кривизну (выпуклости) поверхности текучести по отношению к гидростатической оси – чем больше значение m , тем сильнее изгиб кривой. Таким образом, параметр m определяет форму кривой пересечения. Для большинства типов бетона значение параметра m располагается между 1.00 и 2.00.

Используя известные значения прочности при одноосном растяжении и сжатии, а также выбранное значение параметра m , значение параметра η_1 можно определить из условия: напряженное состояние материала, соответствующее его пределу прочности при одноосном сжатии, должно соответствовать условию текучести.

Учитывая все вышеизложенное, новая формулировка функции текучести будет иметь вид:

$$\eta_1 = \left(\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right) \cdot \left(\frac{|I_1|}{\rho_a} \right)^m \quad (3.92)$$

Анализируемое напряженное состояние имеет следующие характеристики (преобразованная исходная система):

$$\begin{aligned} \sigma_I &= \sigma_{II} = -f_t \\ \sigma_{III} &= -(f_t + f_c) \\ I_1 &= \sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III} \\ I_3 &= \sigma_I \cdot \sigma_{II} \cdot \sigma_{III} \end{aligned} \quad (3.93)$$

где, f_t и f_c – значения прочности при одноосном растяжении и сжатии соответственно;

I_1 и I_3 – необходимые инварианты анализируемого напряженного состояния.

Подставив значения I_1 и I_3 в новую функцию текучести 3.92, получаем значение неизвестного параметра η_1 .

Следующая таблица содержит примерные значения параметров модели *LADE*, зависящие от выбранного бетона. Данные значения были получены в результате расчета с использованием уравнений, рассмотренных ранее (классификация класса бетона согласно *EC2*, Предельные состояния материала/*Ultimate Limit State*).

Класс прочности	f_{cd} [кН/м ²]	$P3 (f_{ctk; 0.05})$ [кН/м ²]	$P2$ [-]	$P1$ [-]
<i>C20/25</i>	13333	1500	1,00	24669,11
			1,50	324095,87
<i>C30/37</i>	20000	2000	1,00	43466,02
			1,50	689515,99
<i>C40/50</i>	26667	2500	1,00	63426,77
			1,50	1153410,57
<i>C50/60</i>	33333	2900	1,00	88162,15
			1,50	1778218,62

Учитывая специфику параметра $P5$, расчетная модель может быть в обязательном порядке дополнена граничным условием (объемный график, характеризующий пространство напряжений, как, например, на рисунке 3.9), который определял бы предел объемного сжимающего напряжения – максимальное значение. В большинстве случаев, ввод данного условия в расчетную модель имеет смысл, в частности, при гидростатическом сжатии. Рассматриваемое граничное условие характеризуется следующим уравнением:

$$f = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} - \sqrt{P_5^2 + P_5^2 + P_5^2} \leq 0 \quad (3.94)$$

Необязательный параметр P_6 характеризует линейный спад прочности материала на растяжение после того, как начальная прочность на растяжение f_t была превышена, так что $f_t(\epsilon_{iu}) = 0$. Если в системе не указано, что материал является идеально пластичным, то в таком случае предел прочности материала при его растяжении определяется начальным значением f_t (предельное значение прочности материала при растяжении). Данная модель растяжения материала подходит только при действии монотонной нагрузки.

Ссылки на первоисточники

В данную модель работы материала заложены концепции и методики, изложенные в первоисточниках [27] (см. п.п. «Список используемой литературы»).

3.10.13 MEMB – Свойства мембранных/текстильных материалов

Используемые характеристики:

<i>MEMB</i>	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>P1</i>	Прочность материала на растяжение (максимальная нагрузка), значение <i>P1</i> = 0.00 распознается системой как «без ввода» - нет ограничения	кН/м	0.00
<i>P2</i>	Коэффициент жесткости при сжатии: 0.00 нет возможности сжатия 1.00 полноценное действие сжатия > 0, > 1 промежуточные значения для определения модуля упругости материала	-	0.00
<i>P3</i>	Изменение значения жесткости мембранного материала при депланации	кН/м	0.00
<i>P4</i>	Изменение значения жесткости сыпучего материала/материала заполнителя	кН/м	0.00

Параметры *P1* и *P2* не должны использоваться для стандартных мембран. Параметр *P1* можно использовать для ввода в систему граничного максимального растягивающего усилия, например. для геотекстильного материала.

Разрушение мембраны под давлением обычно моделируется в модуле *ASE* при помощи команд *SYST ... NMAT JES*. Для ввода в расчетную систему линейно-упругих мембранных материалов используется команда *NMAT MEMB* модуля *AQUA*. Примеры расчета и анализа линейных мембранных материалов расположены в файле *atrium.dat: ase.dat → english → membranes → atrium.dat*.

В соответствии с исследованием ученых Галлиота и Люхзингера (*Galliot & Luchsinger* [28]) при помощи параметров *P3* и *P4* можно активировать нелинейные свойства мембранного материала с заполнителем. Параметры *P3*

(ΔE_w) и $P4$ (ΔE_f) характеризуют нелинейные изменения жесткости мембранного материала в направлении депланации и материала заполнителя в зависимости от отношения напряжений σ_w и σ_f , возникающих в мембранном материале при депланации и материале заполнителя соответственно. Пример использования данных параметров расположен в файле *nonlinear_warp_fill_behaviour.dat: ase.dat* → *english* → *membranes* → *nonlinear_warp_fill_behaviour.dat*.

Обратите внимание, что в составе команды *MAT* модуль упругости E вводится в кН/м^2 , а в составе команды *NMAT MEMB* параметры $P1$, $P3$ и $P4$ вводятся в кН/м (см. пример в файле *atrium.dat*).

$$\gamma_w = \frac{\sigma_w}{\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_f^2}} \quad \gamma_f = \frac{\sigma_f}{\sqrt{\sigma_w^2 + \sigma_f^2}} \quad (3.95)$$

Зависимость между напряжениями и деформациями представлена следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_w \\ \varepsilon_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_w(\gamma_w)} & \frac{-\nu_{wf}}{E_w(\gamma_w)} \\ \frac{-\nu_{wf}}{E_w(\gamma_w)} & \frac{1}{E_f(\gamma_f)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_w \\ \sigma_f \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

Из уравнения 3.96, описывающего зависимость напряжений от деформаций, можно выразить уравнения жесткости мембранного материала при депланации и жесткости материала заполнителя соответственно:

$$E_w(\gamma_w) = \Delta E_w \left(\gamma_w - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + E^{1:1}_w \quad (3.97)$$

$$E_f(\gamma_f) = \Delta E_f \left(\gamma_f - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) + E^{1:1}_f \quad (3.98)$$

3.10.14 Пользовательские модели поведения материалов

Параметры, используемые для введения в расчетную систему пользовательских моделей поведения материалов *USP1..USP8* и *USD1..USD8*.

Для продвинутого пользователя модулей *TALPA* (для *QUAD* элементов) и *ASE* (для *BRIC* элементов) предлагается возможность собственноручно разработать расчетную модель поведения нелинейных материалов (в настоящее время данная функция доступна только для ОС *WINDOWS*). Ниже более подробно описывается работа по созданию подобной модели.

Пользовательские модели поведения материалов должны быть предоставлены в виде динамически подключаемой библиотеки (*Dynamic Link Library – DLL*) с произвольным именем. Переменная или изменяемый параметр *SOFISTIK_USERMATDLL* должен быть задан с именем именно этой *DLL* библиотеки. Это можно сделать в командной строке *CMD*

```
SET SOFISTIK_USERMATDLL=my_material
```

или путем добавления записи

```
SOFISTIK_USERMATDLL=my_material
```

в файл *SOFISTIK.DEF*. В обоих случаях пользовательские модели поведения материалов в библиотеке *my_material.dll* подгружаются самостоятельно во время расчета/прогона системы. Сама последовательность команд в расчетной модели выглядит следующим образом:

```
NMAT3D\_USD( Ss, SsPrim, deltaSn, Snle, StateV, Mtype,  
            ParMat, ElcMat, D, C, Ctrl, deltaTime, iNonl,  
            iUpd, iErr, NrEl, iGP )
```

Используемые параметры для создания модели приведены в следующей таблице:

Параметры	<i>Dim</i> (размерность)	Тип данных	Описание
Ss	6	<i>Double</i>	Тензор упругого напряжения (экспериментальное напряжение) [xx, yy, zz, xy, xz, yz]
SsPrim	6	<i>Double</i>	Тензор первичного напряженного состояния [xx, yy, zz, xy, xz, yz]
deltaSn	6	<i>Double</i>	Приращение деформаций, связанное с первичным состоянием [xx, yy, zz, xy, xz, yz]
Snle	6	<i>Double</i>	Не используется
StateV	10	<i>Double</i>	Переменные состояния системы
Mtype	1	<i>Integer</i>	Идентификатор типа материала USP1-USP8 → 101-108 USD1-USD8 → 109-116
ParMat	12	<i>Double</i>	Параметры нелинейного материала P1-P12
ElcMat	16	<i>Double</i>	Константы упругого материала из записи 001/No: 1, @1- @14 (при необходимости умножается на коэффициент жесткости <i>FACS</i> !). Кроме того, параметр <i>FACS</i> в позиции 15 и, в зависимости от случая, может являться толщиной <i>QUAD</i> элемента в позиции 16.
D	(6,6)	<i>Double</i>	Матрица жесткости упругого материала
C	(6,6)	<i>Double</i>	Коэффициент упругой податливости
Ctrl	5	<i>Single</i>	Значения управления из команды

Параметры	<i>Dim</i> (размерност)	Тип данных	Описание
			<i>CTRL MSTE</i>
delta Time	1	<i>Double</i>	Не используется
NrEl	1	<i>Integer</i>	Номер элемента
iGP	1	<i>Integer</i>	Идентификатор точки Гаусса
<p>Типы переменных:</p> <p><i>Double</i> – числа или значения с плавающей точкой, то есть значения, имеющие дробную часть.</p> <p><i>Integer</i> – тип данных, характеризующийся множеством целых значений, то есть значения, которые не имеют дробной части.</p> <p><i>Single</i> – данный тип данных используется для хранения значений с плавающей запятой, которые не требуют полного размера <i>Double</i>.</p>			

Возвращаемые значения:

Параметры	<i>Dim</i> (размерност)	Тип данных	Описание
Ss	6	<i>Double</i>	Обновленный тензор напряжений [xx, yy, zz, xy, xz, yz]
Snle	6	<i>Double</i>	Не используется
StateV	10	<i>Double</i>	Обновленные переменные состояния системы
D	(6,6)	<i>Double</i>	Обновленная (тангенциальная) матрица жесткости материала
iNonl	1	<i>Integer</i>	=0 для линейно-упругой реакции =1 для нелинейной реакции
iUpd	1	<i>Integer</i>	=0 матрица жесткости не обновляется =1 обновление матрицы жесткости (только в ASE)

Параметры	<i>Dim</i> (размерность)	Тип данных	Описание
iErr	1	<i>Integer</i>	Идентификатор ошибок =0 без ошибок =1 ошибка → завершение расчета = -99 нет предоставленной пользователем модели материала → завершение расчета

Типы переменных:

Double – числа или значения с плавающей точкой, то есть значения, имеющие дробную часть.

Integer – тип данных, характеризующийся множеством целых значений, то есть значения, которые не имеют дробной части.

3.11 ВМАТ – Упругое основание/граница раздела двух материалов

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала	-	1
<i>C</i>	Упругая постоянная по нормали к поверхности C_s	[кН/м ³] ₁₀₉₇	0
<i>CT</i>	Упругая постоянная по касательной к поверхности C_t	[кН/м ³] ₁₀₉₇	0
<i>CRAC</i>	Максимальное растягивающее напряжение на границе раздела	[кН/м ²] ₁₀₈₉	0
<i>YIEL</i>	Максимальное напряжение на границе раздела	[кН/м ²] ₁₀₈₉	-
<i>MUE</i>	Коэффициент трения на границе раздела	-	-
<i>COH</i>	Связность материалов на границе раздела	[кН/м ²] ₁₀₈₉	-
<i>DIL</i>	Коэффициент дилатансии	-	0
<i>GAMB</i>	Приведенное распределение масс	[т/м ²] ₁₁₈₄	0
<i>TYPE</i>	Используемые шаблоны <i>PESS</i> Плоское напряжённое состояние <i>RAIN</i> Плоское деформированное состояние <i>HALF</i> Круглый диск на полупространстве <i>CIRC</i> Круглое отверстие на бесконечном диске <i>SPHE</i> Сферическое отверстие на бесконечном пространстве <i>NON</i> шаблон не задан	<i>LIT</i>	-
<i>MREF</i>	Номер основного материала	-	<i>NO</i>
<i>H</i>	Исх-ый размер (толщина <i>H</i> или радиус <i>R</i>)	[м] ₁₀₀₁	!

Параметр *VMAT* позволяет задать в расчетной системе материал (например, *MATE/CONC/BRIC*) для упругого основания. Таким образом, плоскому *QUAD* элементу можно присвоить свойства пластины и грунта при помощи только одного номера материала. Жесткость основания можно рассчитать при помощи упругих констант материала *MREF*, геометрическому параметру *H* и топологических проектных норм. В программе расчет основания основан на методе коэффициента постели (Винклер, Цимерман/Пастернак – *Winkler, Zimmermann/Pasternak*). Данный метод облегчает расчет упругих оснований за счет оригинального инженерного решения, которое заключается в том, что в расчетной системе игнорируются сдвиговые деформации, возникающие в пределах основания. Все явления, возникающие в основании, могут оказывать непосредственное влияние на балочные или плитные элементы, но в большинстве случаев основание в расчетной системе всегда анализируется, как отдельный элемент. (см. описание *SPRI, BOUN, BEAM* или *QUAD* элементов и более общее описание профильных элементов *BORE*).

Процесс определения приемлемого значения коэффициента постели часто вызывает значительные трудности, так как это значение зависит не только от свойств материала, но и от геометрических параметров и нагрузок. При оценке точности результатов анализа, полученных в результате использования данного метода, нужно всегда учитывать влияние этих особенностей расчетной системы.

Параметры *C* и *CT* используются для ввода в систему основания, состоящего из *QUAD* элемента, определения его свойств и условий разделения двух смежных материалов (свойства границы разделения двух материалов/контактный слой). Таким образом, как пример расчетной системы, плоский плитный *QUAD* элемент основания будет выполнен из бетона (фундамент), а при помощи команды *VMAT* в систему будут введены свойства грунтового основания –связь с тем же номером материала грунта, который был задан ранее. Параметр *C* характеризует способность плоского *QUAD* элемента сопротивляться воздействию, направленному по его нормали в направлении локальной оси *z*, в то время, как параметр *CT* характеризует способность плоского

QUAD элемента сопротивляться воздействию сдвига, приложенному к элементу в любом направлении.

Если границе элемента основания (*GLN*) приписан тот же материал с теми же свойствами, что и у основания, то вдоль этой границы будут сгенерированы пружинные элементы, исходя из значения ширины и расстояния между узлами опирания.

В некоторых случаях, а именно в случаях с постоянным значением давления, вместо прямого ввода характеристик, оперируя только значениями модуля упругости материала и коэффициента Пуассона μ , можно выбрать материал и исходные размеры элемента из специального справочника [1]:

- Плоский слой с ограничением перемещения по горизонтали, например, при моделировании упругого основания с колоннами и несущими стенками (плоское напряженное состояние):

$$C_s = \frac{E}{H} \cdot \frac{1}{(1+\mu)(1-\mu)} \quad C_t = \frac{E}{H} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)} \quad (3.99)$$

- Плоский слой с ограничением перемещения по горизонтали, например, для формирования слоев грунтового основания (плоское напряженное состояние):

$$C_s = \frac{E}{H} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad C_t = \frac{E}{H} \cdot \frac{1}{(1+\mu)} \quad (3.100)$$

- Эквивалентный круглый диск с радиусом R на бесконечном полупространстве:

$$C_s = \frac{E}{R} \cdot \frac{2}{\pi(1+\mu)(1-\mu)} \quad (3.101)$$

- Круговое отверстие с радиусом R в бесконечном диске с учетом плоского деформированного состояния (трубы в грунте или сваи):

$$C_s = \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad C_t = C_s \quad (3.102)$$

- Сферическое отверстие радиусом R в бесконечных объемных упругих сплошных средах:

$$C_s = \frac{E}{R} \cdot \frac{2}{(1 + \mu)} \quad C_t = C_s \quad (3.103)$$

С учетом коэффициента дилатансии, характеризующего изменение объема материала под действием сдвиговых деформаций, для расчета напряжений, возникающих в основании, имеется следующее уравнение, которое учитывает, как нормальные, так и поперечные смещения в массиве:

$$\sigma = C_s \cdot (u_s + DIL \cdot u_t) \quad \tau = C_t \cdot u_t \quad (3.104)$$

Нелинейные явления контролируются командами *CRAC*, *YIEL*, *MUE* и *CON*:

Трещинообразование: По достижению разрушающих напряжений граница раздела материалов выключается из работы системы, как вдоль оси, так и перпендикулярно ей. В данном случае разрушающей нагрузкой всегда является растягивающее усилие. Если реакция основания прикладывается к плоскому *QUAD* элементу, то последующая за этим деформация в направлении локальной оси z создаст сжимающие (отрицательные) напряжения.

Предельная нагрузка/предел текучести: При достижении предела текучести главная деформационная составляющая границы раздела материалов увеличивается без увеличения напряжения.

Трение/сцепление материалов: Определяя коэффициент трения и/или сцепления, поперечное напряжение при сдвиге не может быть больше, чем:

коэффициент трения \times нормальное напряжение + коэффициент сцепления

Обратите внимание, что до достижения этого предела в

эlemente будут возникать напряжение сдвига только при наличии деформации – поперечная жесткость CT .

Если граница раздела выключилась из работы системы ($CRAC$), то боковая часть основания включается только в том случае, если для коэффициентов трения и сцепления было введено значение 0,00.

Нелинейные свойства могут учитываться только при нелинейном анализе системы. Трение является следствием влияния боковой части основания, в то время как все остальные эффекты действуют исходя из главного направления границы раздела материалов.

3.12 HMAT – Константы/постоянные материала (модуль HYDRA)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала	-	1
<i>TYPE</i>	Тип свойств материала: <i>DRAC</i> Проницаемость (закон Дарси, линейный) <i>FORC</i> Проницаемость (закон Форгеймера, нелинейный) <i>MISS</i> Проницаемость (закон Миссбаха/ <i>Missbach</i> , нелинейный) <i>FLOW</i> Общая диффузия (например, пар) <i>FOUR</i> Теплопередача (закон Фурье, линейный) Гидратация бетона: <i>JONA</i> Модель Джонассона/ <i>Jonasson</i> <i>HSCM</i> Модель «Сжимающееся ядро»/ <i>Shrinking-Core model</i> <i>WESC</i> Датская модель (модель <i>Wesche</i>)	<i>LIT</i>	*
<i>TEMP</i>	Температура или уровень давления в порах грунта	*	0
<i>KXX</i>	Изотропная проницаемость или	*	0
<i>KYY</i>	проводимость	*	0
<i>KZZ</i>	или анизотропная	*	<i>KXX</i>
<i>KXY</i>	проницаемость/проводимость	*	<i>KXX</i>
<i>KXZ</i>	или параметры <i>A, B</i> (закон Форгеймера)	*	0
<i>KYZ</i>	или параметры <i>C, M</i> (закон Миссбаха)	*	0

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>S</i>	Удельная емкость/коэффициент	*	0
<i>NSP</i>	водовместимости или теплоемкости: эффективная пористость или степень влажности	-	0
	Параметры гидратации:		
<i>A</i>	Константа <i>a</i> для <i>JONA/HSCM/WESC</i>	-	*
<i>B</i>	Константа <i>b</i> для <i>JONA/WESC</i>	-	*
<i>C</i>	Константа <i>c</i> для <i>WESC</i>	-	*
<i>QMAX</i>	Максимальное количество тепла при процессе гидратации	кДж/м ³	0
<i>TK</i>	Момент начала отсчета/момент времени	часов	15
<i>TITL</i>	Название/обозначение материала	<i>Lit32</i>	-

Команда *HMAT* позволяет задать в системе три отдельных набора констант для трех задач, связанных с расчетом и анализом материала: диффузия, проницаемость и теплопередача. Свойства материала должны устанавливаться исходя из экспериментальных данных, а также из литературных источников (справочников). В данном руководстве рассматриваются приблизительные значения свойств материала, не соответствующие действительности.

Абсолютно любой материал может иметь в расчетной системе до 15 конфигураций свойств в зависимости от температуры [$^{\circ}\text{C}$ Цельсия] или давления воды (жидкости) в порах [$\text{kPa} = \text{kN}/\text{m}^2$]. При нелинейном анализе системы значения свойств материала интерполируются между всеми этими значениями (конфигурациями).

3.12.1 Гидравлические характеристики

Проницаемость (*DARC*, *FORC*, *MISS*) и проводимость (*KXX*, *KYY*, *KZZ*) материала измеряется в [м/сек], коэффициент водовместимости (*S*) измеряется в [м³/м], а давление (*TEMP*) в [КПа].

Так, например, в таблице ниже представлены грунты и соответствующие им значения коэффициента фильтрации (согласно исследованиям *Dyck S.* и *G. Peschke* – германия).

Тип грунта	K_f [м/сек]
Мелкий щебень/гравийно-песчаная смесь	$3 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4}$
Гравелистый песок/морской песок	$1 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-4}$
Среднезернистый песок	$4 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-4}$
Илистый песок	$2 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$
Пылеватый песок	$5 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-6}$
Илистая/пылеватая глина	$5 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-8}$
Глина	$\approx 10^{-8}$

Положительное избыточное давление характеризует течение вод в насыщенной пористой среде, а отрицательное избыточное давление в ненасыщенной пористой среде. В данном случае проводится интерполяция значений проницаемости и водовместимости материала. При решении задач, связанных со свободной поверхностью воды (жидкости), используется значение изменения пористости в материале для учета его фактической водовместимости.

В зависимости от напряженного состояния элемента системы, информация о котором хранится в базе данных, свойства материала могут быть заданы как изотропные, так и анизотропные. Определение данных свойств осуществляется при помощи дополнительных параметров, которые привязаны к тому же номеру материала и его типу *FVOL*, *FSIN* или *FSIT*. Разница между типами материала *FSIN* и *FSIT* определяется тем фактом, что для материала *FSIN* изменение значений свойств осуществляется вдоль трещины, а для *FSIT* изменение

происходит перпендикулярно трещине. Для этой цели рекомендуется использовать линейные поля напряжений, а не поля пластичности.

В модуле *HYDRA* пользователь имеет возможность задавать свойства материала для отдельных элементов либо через заданный номер материала (инженерные сооружения), либо через узлы (номер материала элемента = 0), что особенно применимо для моделей грунтовых вод. Оба метода могут использоваться вместе в одной и той же расчетной системе.

Общая диффузия, согласно теории потенциала, и проводимость (K_{XX} , K_{YY} , K_{ZZ}) измеряется в [м/сек], а коэффициент водовместимости (S) измеряется в [кг /м³/Па] = [м/ сек²].

3.12.2 Теплопроводность/теплопередача

Теплопроводность/теплопередача материала описывается уравнениями Фурье (*FOUR*). Проводимость (K_{XX} , K_{YY} , K_{ZZ}) измеряется в (Вт/(К•м)), а коэффициент теплоемкости материала (S) измеряется в [Дж/(К•кг³)]. Параметр *TEMP* позволяет задать температуру в системе в °С или К (Кельвинах). Изменение единицы измерения температуры осуществляется за счет подстановки соответствующего обозначения в таблицу свойств материала. Пример таблицы приведен ниже.

Материал	Теплопроводность λ [Вт/(К•м)]	Теплоемкость c [Дж/(К•кг ³)]	Коэффициент относительного удлинения [-]	Мощность теплового излучения ϵ [-]
Преднапряженный бетон	0,14-1,20	1050		
Лёгкий бетон, пенобетон, газобетон	0,70-1,20	1050		
Бетон	1,60-2,10	1050	$1,00 \cdot 10^{-5}$	
Кирпичная кладка	0,50-1,30	950		0,93
Теплоизоляция	0,02-0,09	950		-
Сталь	50	850	$1,20 \cdot 10^{-5}$	0,06-0,67
Медь	380	850	$1,60 \cdot 10^{-5}$	0,04-0,78
Алюминий	200	850	$2,40 \cdot 10^{-5}$	0,05-0,30
Пиломатериалы/древесина	0,13-0,20	2500	$0,18 \cdot 10^{-3}$	
Вода	0,58	4187 $(S = c \cdot \rho)$		

Если материалы были заданы с помощью команд *CONC*, *STEE*, *TIMB*, *BRIC* или *TYPE* в составе *MATE*, все константы теплопроводности материала *FOUR*

будут устанавливаться согласно нормативному документу *EN 12524*. Для бетона и древесины будет учитываться коэффициент водовместимости – параметр *NSP*.

При явном значении параметра *TEMP* можно создавать и изменять табличные значения свойств материала. По умолчанию используется формула, представленная в Еврокоде. Теплопроводность бетона определяется верхним ($A = 1,0$) и нижним пределом ($A = 0,0$). Особым эффектом для параметра *S* является процесс испарения воды (жидкости из пор материала).

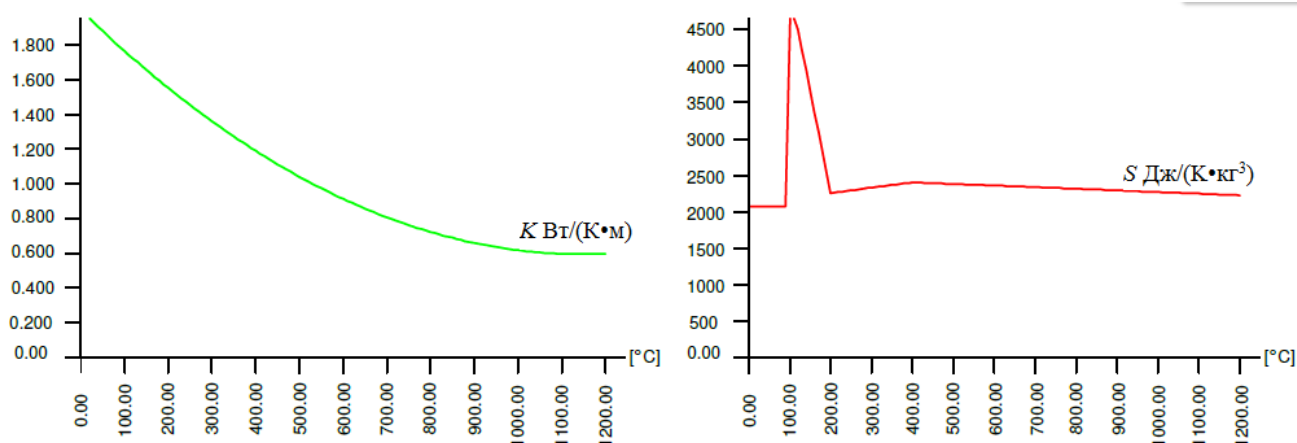


Рис. 3.17 – Теплопроводность и теплоемкость бетона

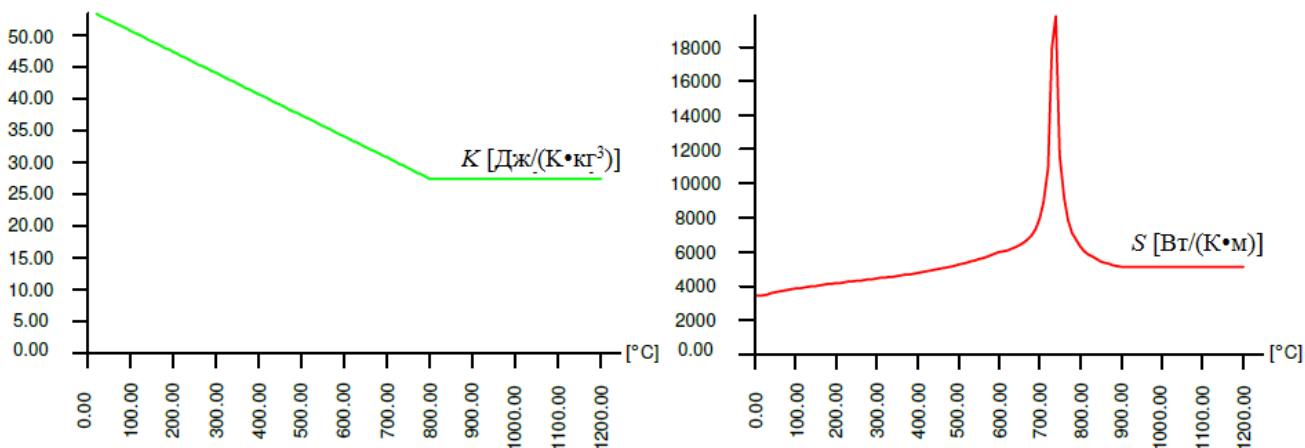


Рис. 3.18 – Теплопроводность и теплоемкость конструкционной стали

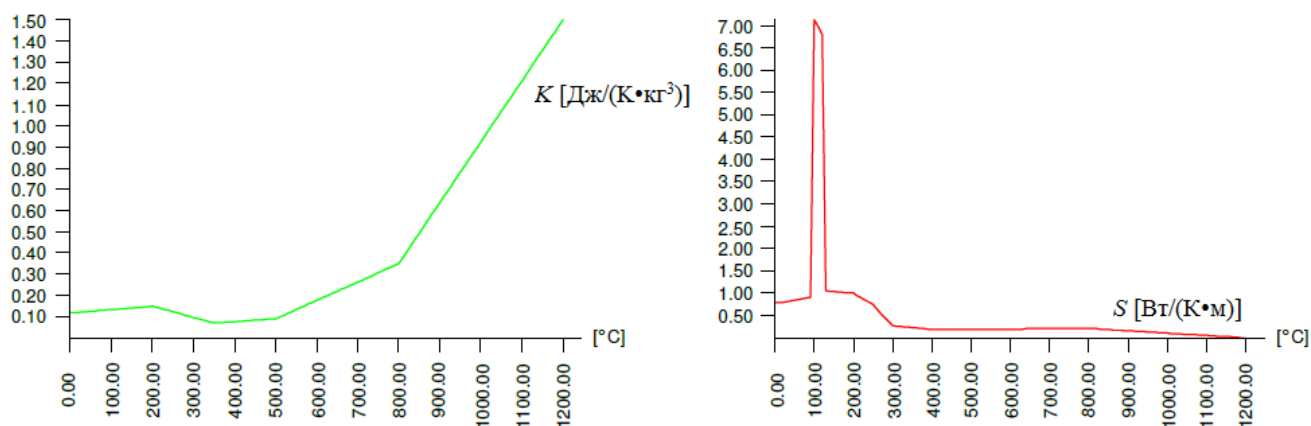


Рис. 3.19 – Теплопроводность и теплоемкость древесины

3.12.3 Гидратация бетона

Для гидратации бетона необходимо знать максимальное количество тепла Q_{MAX} , выделяемое при реакции цемента с водой (гидратация), функцию, описывающую фактический срок службы бетона (см. руководство к модулю *HYDRA* команда *CTRL TEFF*) и формулу для расчета степени гидратации α , определяющей значения всех остальных свойства бетона. Существует множество способов расчета гидратации бетона при помощи различных параметров. Все эти параметры представлены ниже:

<i>TEMP</i>	Контрольное значение температуры	[°C]	10,00
<i>QMAX</i>	Максимальное количество теплоты	[КДж/м³]	!
<i>TK</i>	Момент начала отсчета τ_k	[h]	15,00
<i>S</i>	Показатель функции окончания процесса гидратации (<i>Saul</i>)		1,00

TYPE JONA

Модель гидратации Джонассона:

$$\alpha = \exp\left(b \left[\ln\left(1 + \frac{\tau_w}{\tau_k}\right) \right]^a\right) \quad (3.105)$$

Примеры значений этих констант a , b и τ_k можно найти в немецком нормативном документе *Heft 512 DAfStB* в приложении А, которые уже прописаны в составе команды *HMAT*, однако, для получения более точных результатов необходимо проведение соответствующих испытаний! К сожалению, в данном руководстве рассмотрены измененные значения параметров a и b .

A, B Параметры a и b [-] -1,15, -1,00

Значения данных параметров, как было сказано ранее, должны быть определены в результате испытаний (в большинстве литературных источников, посвященных данной теме, общее выделяемое количество тепло измеряется [кДж/кг]). Однако, в последующей таблице приведены приблизительные значения данных параметров:

	Q_{max} [кДж/м ³]	a	b	τ_k
<i>B25 (Heft 512 DAfStB)</i>	167700	-0,925	-0,420	41,820
<i>B35WU (Heft 512 DAfStB)</i>	135750	-1,185	-1,000	17,530
<i>B35 (Heft 512 DAfStB)</i>	105940	-1,605	-1,000	37,460

TYPE HSCM

Модель «Сжимающееся ядро»:

$$\alpha = \frac{a \cdot (\tau_w - \tau_k)}{1 + a \cdot (\tau_w - \tau_k)} \quad \tau_w > \tau_k \quad (3.106)$$

где, τ_k –временной период химической реакции с очень низкой температурой, обозначаемый d в исходной формуле.

Значения параметров τ_k и a для бетонного массива следующие (*Dussinger*):

$$\tau_k = 2.88[h] \quad a = 0.029[1/h] \quad (3.107)$$

TYPE WESC

Датская модель гидратации (модель *Wesche*):

$$\alpha = \exp\left(-\left(\frac{\tau_k}{\tau_w}\right)^b\right) \quad (3.108)$$

$$\beta = \frac{f_{cc}(t)}{f_{cc}(28d)} = a \cdot \exp(c \cdot t^{-0.55}) \quad c = c_1 \cdot \frac{w_0}{z} \quad (3.109)$$

Водоцементное отношение w_0/z должно быть включено в состав параметра c . Обратите внимание, что в оригинальной формуле параметр a используется с двумя разными значениями. Следующие значения, приведенные в таблице, параметров модели *Wesche* можно найти в соответствующей литературе.

	Q_{max} [КДж/м ³]	a			c_1
w_0/z		0,35	0,55	0,75	
Z 55 / Z 45 F	380	1,10	1,15	1,20	-1,50
Z 45 L / Z 35 F	295	1,20	1,30	1,40	-2,80
Z 35 L	216	1,30	1,50	1,70	-4,40
Z 25		1,50	1,90	2,30	-7,10

Значения параметров для бетонного массива (Z 35 L) следующие (*Dussinger*):

$$\begin{aligned} \tau_k &= 24.87[h] \\ b &= 0.84[-] \\ w_0/z &= 0.68[-] \\ a &= 1.63[-] \\ c_1 &= -4.4[-] \Rightarrow c = -4.4 \cdot 0.68 = -2.99 \end{aligned} \quad (3.110)$$

ПРИМЕЧАНИЕ: Если используется функция *Saul* (см. начало п.п. 3.12.3), то значения для экспоненты s может быть указано при помощи параметра S .

3.13 CONC – Свойства бетона

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала (1-999)	-	1
<i>TYPE</i>	Тип бетона (см. примечание): <i>C, LC</i> без дефектов/легкий бетон	<i>LIT</i>	*
<i>FCN</i>	Номинальный класс прочности ($f_{ck}/f_{cwk}/f_c$ и т. д.)	Н/мм ²	*
<i>FC</i>	Прочность бетона на сжатие	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FCT</i>	Прочность бетона на растяжение	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FCTK</i>	Нижний квантиль прочности	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>EC</i>	Модуль упругости	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>MUE</i>	Коэффициент Пуассона или модуль упругости при сдвиге	-	0,20
<i>GAM</i>	Объемный вес	[кН/м ³] ₁₀₉₁	25
<i>ALFA</i>	Коэффициент температурного расширения	[1/К] ₁₀₈₃	<i>1E-5</i>
<i>SCM</i>	Типовой коэффициент запаса прочности материала	-	*
<i>TYPR</i>	Тип предельного состояния <i>LINE</i> Постоянное значение модуля упругости <i>A, B</i> параметры кратковременного воздействия (<i>EN 1992</i>)	<i>LIT</i>	*
<i>FCR</i>	Прочность при нелинейном анализе	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>ECR</i>	Модуль упругости при эксплуатации	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FBD</i>	Расчетная/проектная прочность соединения/сцепления	[Н/мм ²] ₁₀₉₃	*
<i>FFAT</i>	Усталостная прочность $f_{cd,fat}$	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FCTD</i>	Расчетная/проектная прочность на	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>FEQR</i>	растяжение Эквивалентная прочность материала на растяжение после образования трещин	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	0,00
<i>FEQT</i>	Предел прочности на растяжение	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	0,00
<i>GMOD</i>	Модуль упругости при сдвиге	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>KMOD</i>	Модуль объемной деформации или упругости	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>RHO</i>	Плотность	[кг/м ³] ₁₁₈₉	*
<i>GF</i>	Энергия разрушения материала (МС 2010, 5.1.5.2)	Н/мм	*
<i>MUEC</i>	Трение в трещинах	-	*
<i>TITL</i>	Наименование/обозначение материала	<i>Lit32</i>	*

3.13.1 Бетон в Еврокоде/*DIN 1045-1/OEN B 4700*

Согласно Еврокоду *EN 1992* и другим нормативным документам, используются следующие типы бетона:

C = бетон без дефектов или качественный бетон

LC = легкий бетон

Учитывая тот факт, что в немецких нормах проектирования *DIN Fachbericht* уже учли все изменения (стандарты, допуски, методы расчета) в то время, как в европейские нормы *EC* только готовятся внести эти изменения, при этом прямо ссылаясь на *DIN 1045-1*, рекомендуется обращать внимание на правильность определения типа материала при помощи параметров *C_EN* или *CDIN*.

Цилиндрическая прочность бетона всегда должна вводиться при помощи параметра FCN . Значение, которое устанавливается программой по умолчанию для данного параметра, равняется 20.

Некоторые свойства зависят от так называемых внутренних или государственных стандартов. Параметр $NORM$ используется для определения этих стандартов. Возможные значения этих стандартов, как пример, приведены в таблицах 3.1 и 3.2 Еврокода EN , в таблицах 9 и 10 $DIN 1045-1$ и. таблице 4 $OEN B 4700$. Данные таблицы в данном руководстве не приводятся.

$FCN = f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$	15	20	25	30	37	45	50	55	60
FCN	55	60	70	80	90	100			
$f_{ck,cube}$	67	75	85	95	105	115			

Значения прочности и модулей упругости рассчитываются программой по умолчанию следующим образом:

$$FC = 0.85 \cdot f_{ck}$$

$$FCT = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (f_{ck} < 55)$$

$$= 2.12 \ln((f_{ck} + 8)/10 + 1) \quad (f_{ck} > 55)$$

$$EC = 9500(f_{ck} + 8)^{0.3} \quad (EN 1992-1992)$$

$$EC = 22000(f_{cm}/10)^{0.3} \quad (EN 1992-2004)$$

$$FBD = 2.25 \cdot f_{ct,0.05}/\gamma \quad (Tbl. 5.3.)$$

Коэффициенты α_{cc} и α_{lc} для учета длительной прочности приведены в приложениях нормативных документов. В Еврокоде указано, что данные коэффициенты должны иметь значения в пределах от 0,8 до 1,0 (по умолчанию рекомендуется значение 1,0). Однако, ПК $SOFiSTiK$ определяет значение по умолчанию 0,85, исходя из соображений обеспечения необходимого запаса прочности. Пользователь также имеет возможность собственноручно ввести необходимое, в соответствии с государственными нормами проектирования, значение коэффициента в состав INI -файла. Явный ввод значения параметра $FC =$

$\alpha_{cc} \cdot FCN$ также возможен. Расчет значений усталостной прочности, прочности соединения или прочности на растяжение, то все корректирующие коэффициенты и коэффициенты запаса, приписанные данным свойствам бетона, должны быть введены пользователем на начальном этапе создания расчетной системы.

При упругих деформациях необходимо различать секущий модуль упругости E_{cm} (параметр EC), важный для определения деформирующих усилий, и касательный модуль упругости $E_{c0,28} = 1,05E_{cm}$ или $E_{c0,28} = E_{cm}/\alpha_i$, используемый при анализе ползучести материала и нелинейном анализе (параметр ECR). Значение параметра α_i определяется в соответствии с *Heft 525 DAfStb* глава 9.1:

$$\alpha_i = 0.8 + 0.2f_{cm}/88 < 1.0 \quad (3.111)$$

Параметр ECR также может быть введен в систему в качестве коэффициента с единицами измерения [-] по умолчанию. В соответствии с *Heft 600 DAfStB* для данного параметра при нелинейном анализе системы рекомендуется использовать значение 0,85.

Для легкого бетона (LC) плотность (RHO) должна быть задана явно в $кг/м^3$.

В дальнейшем значения параметров GAM и EC будут определены следующим образом:

$$E_{cml} = E_{cm} \cdot (\rho/2200)^2 \quad (3.112)$$

Для легкого бетона значения прочности на растяжение, прочности соединения и предельных деформаций масштабируются при помощи коэффициента η_I . Для данного случая функция зависимости между разрушающими напряжениями и соответствующими деформациями будет билинейная (рис. 3.20). Исходя из заданного веса и прочности бетона, различные коэффициенты, предназначенные для учета природного песка и других компонентов строительного материала, подбираются в модуле *AQUA* автоматически.

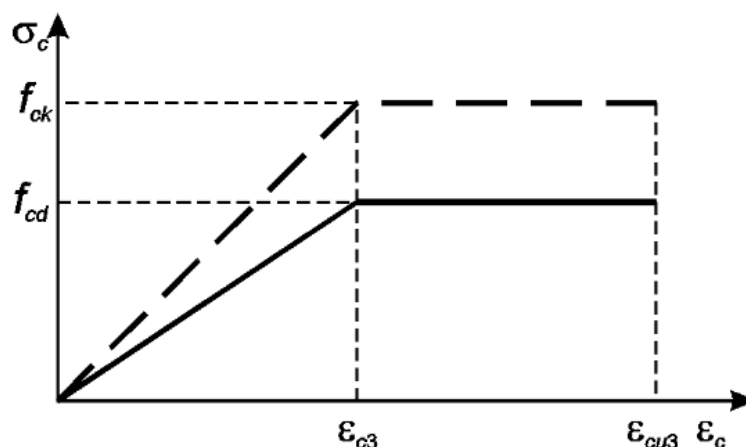


Рис. 3.20 - Билинейная зависимость между напряжением и деформацией

Усталостная прочность бетона может быть введена в систему с помощью параметра *FFAT*. Формула 6.76, приведенная в документе *EN 1992-1-1 G1*, зависит от параметров, которые не рассмотрены в данном руководстве: количество циклов нагружения, тип цемента, возраст на момент проектирования и частный коэффициент запаса прочности. Учитывая данный факт, пользователю необходимо собственноручно ввести конечные значения данных параметров:

$$f_{cd,fat} = k_1 \cdot \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right); \quad k_1 = 0.85 / 1.0 \quad (3.113)$$

$$\beta_{cc}(t_0) = e^{s(1 - \sqrt{28/t_0})}; \quad s = 0.20(R) / 0.25(N) / 0.38(S)$$

Для детального анализа бетона в соответствии с приложением 1 пользователю необходимо знать тип цемента. Для этого ему необходимо добавить к выбранному классу бетона соответствующий параметр, обозначающий класс цемента:

- | | |
|----------|--|
| <i>N</i> | Нормальный цемент ($\alpha = 0,00$) |
| <i>S</i> | Медленно твердеющий цемент ($\alpha = -1,00$) |
| <i>R</i> | Быстротвердеющий/высокопрочный цемент ($\alpha = +1,00$) |

В расчетах на огнестойкость конструкции требуется различать бетон с кварцевым и известняковым заполнителем. Во втором случае к типу цемента можно добавить дополнительный параметр *C*: *NC*, *SC* и *RC*.

Обычный график зависимости напряжений от деформаций типа С имеет вид параболически-прямоугольной диаграммы (рис. 3.21).

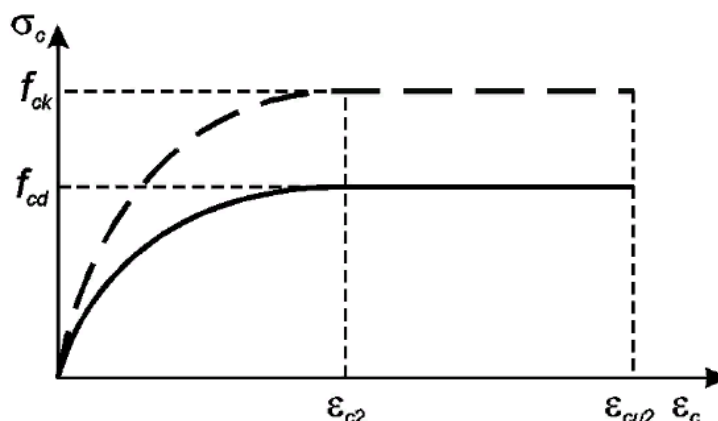


Рис. 3.21 – Параболически-прямоугольная диаграмма для бетона при сжатии

При нелинейном анализе или анализе деформаций доступны другие типы диаграмм A/B, описываемые следующей функцией (рис. 3.22):

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{k \cdot n - n^2}{1 + (k - 2) \cdot n} \quad (3.114)$$

где, $n = \varepsilon/\varepsilon_{c1}$;

$k = E_{c0} \cdot \varepsilon_{c1}/f_c$.

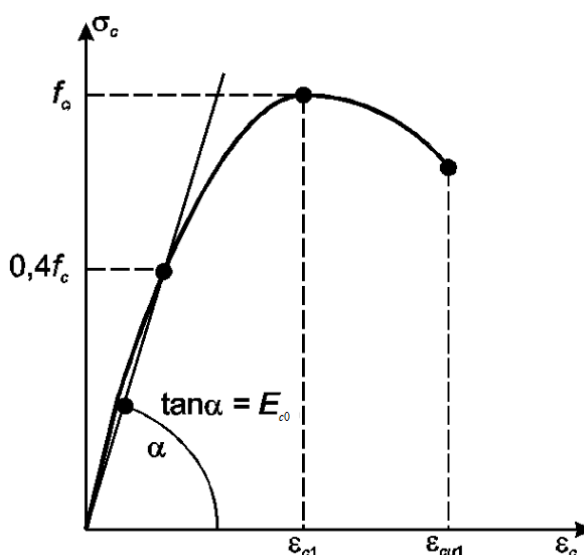


Рис. 3.22 – График зависимости «напряжение-деформация» для нелинейных расчетов конструкций (использование $0,4f_c$ для определения E_{c0} является приближением)

При f_c значение $f_{ck} + 8$ используется для построения кривых *A* и *B*. Максимальное значение деформации ограничено и зависит от прочности бетона. Линия *B* (рис. 3.22) не имеет нисходящей ветви, и, следовательно, она, возможно, более стабильна в плане значений. Линия *C* (рис. 3.21) имеет свои значения напряжений даже при очень больших деформациях и является наиболее достоверным вариантом отображения данной зависимости – напряжения-деформации.

Коэффициенты запаса прочности *SCM* равны 1,5 (в Италии – 1,6). Однако, данные коэффициенты должны быть введены в систему пользователем, т.к. они зависят от комбинаций нагрузок. Для бетона с высокой прочностью коэффициент запаса будет увеличен на γ' . Увеличенное значение коэффициента запаса в обязательном порядке и незамедлительно будет учтено программой при определении зависимости напряжений от деформаций, что в итоге позволит определить и использовать глобальный коэффициент запаса прочности для всей конструкции.

Исходя из требований, приведенных в *DIN 1045-1*, при нелинейном анализе системы с единым коэффициентом запаса прочности прочность бетона будет уменьшена до значения $0,85af_{ck}$, тогда как процент армирования будет увеличен. При использовании норма *DIN 1045-1* метод нелинейного анализа напряжений определяется программой автоматически. При использовании норм *DIN EN1992* альтернативные методы определения зависимости напряжений от деформаций для бетона (*CONC*) и стали (*STEE*) выбираются пользователем самостоятельно с помощью команды [SSLA CALC 1.3](#).

Для сталефибробетона в соответствии с требованиями *DBV-Merkblatt* (октябрь 2001, 4.2) разрешено использовать более высокие значения прочностей на изгиб и на растяжение для элементов толщиной не более 60 см толщиной. При желании пользователь может собственноручно ввести необходимое ему значение прочности *FCTD*. (с коэффициентом 1,6-*d*). Однако, если известны значения только параметра *FEQR* или *FEQT*, прочность бетона на растяжение применяется

при расчете системы и ее нелинейном анализе. Значения, приведенных в данном абзаце параметров, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} FCTD &= f_{,ctd} &&= f_{,ctk,fi} \cdot \alpha_{ct}^f / \gamma_{ct}^f \\ FEQR &= f_{eq,ctd,i} &&= f_{eq,ctk,i} \cdot \alpha_{ct}^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \\ FEQT &= f_{eq,ctd,ii} &&= f_{eq,ctk,ii} \cdot \alpha_{ct}^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \end{aligned}$$

$$\alpha_c^f = 0.85 (C) / 0.75 (LC)$$

$$\alpha_{sys} = 1.0 \Rightarrow 0.8 (d = 15 \Rightarrow 60 \text{ cm, Bild 4.1})$$

$$\gamma_{ct}^f = 1.25 (\geq F0.6)$$

Данные параметры характеризуют зависимость напряжения-деформации – рисунки 4.2 или 4.3. нормативного документа *DBV*.

Увеличенный коэффициент запаса (п.п. 2.4.2.5 *EN 1992 (2004)*) для монолитной сваи с $k_f = 1,10$ должен быть введен пользователем самостоятельно.

3.13.2 Бетон в *DIN 1045 (старый)/DIN 4227/DIN 18806*

В старых нормах *DIN* используются следующие обозначения бетона:

B Обычный бетон (*DIN*)

LB Легкий бетон (*DIN*)

SB Предварительно напряженный бетон (*DIN*)

По умолчанию параметр *FCN* равен 25 для бетона *B* и *LB* и 45 для *SB*. Значение параметра *FCT* определяется по формуле:

$$FCT = 0.25 \cdot FCN^{2/3} \tag{3.116}$$

Ниже в таблице приведены значения параметров, принимаемые программой по умолчанию в соответствии с нормами *DIN 1045 (старый)/DIN 4227/DIN 18806*:

<i>FCN</i>	10	15	25	35	45	55
<i>FC:</i>						
<i>B (DIN 1045)</i>	7	10.5	17.5	23		30
<i>B (DIN 4227)</i>	-	-	15,0	21		33
<i>FBD:</i>	-					

<i>B (DIN 1045)</i>		1.4	1.8	2.2		3.0
<i>EC</i>	22000	26000	30000	34000	37000	39000

Для высокопрочного бетона:

<i>FCN</i>	65	75	85	95	105	115
<i>FC</i>	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	64.0
<i>EC</i>	40500	42000	43000	44000	44500	45000

Для легкого бетона необходимо указывать плотность самостоятельно. По умолчанию значения параметров *GAM* и *EC* устанавливаются в соответствии с требованиями *DIN 1055*. Для описания прочностных свойств легкого бетона обычно используется билинейная форма зависимости напряжений и деформаций.

Для детального анализа ползучести и усадки бетона в соответствии с нормативным документом *DIN 4227* пользователю необходимо знать вид цемента и консистенцию (подвижность) бетонной смеси. Данные характеристики материала могут быть учтены в расчетной системе путем добавления соответствующего параметра к классу бетона в командной строке системы:

<i>KS</i>	Нормальный цемент (<i>Z35 F/Z 45F</i>) жесткая смесь
<i>KP</i>	Нормальный цемент (<i>Z35 F/Z 45F</i>) пластичная смесь
<i>KR</i>	Нормальный цемент (<i>Z35 F/Z 45F</i>) литая смесь
<i>SL</i>	Медленнотвердеющий цемент (<i>Z 25, Z35L/Z45L</i>) жесткая смесь
<i>PL</i>	Медленнотвердеющий цемент (<i>Z 25, Z35L/Z45L</i>) пластичная смесь
<i>RL</i>	Медленнотвердеющий цемент (<i>Z 25, Z35L/Z45L</i>) литая смесь
<i>SR</i>	Быстротвердеющий цемент (<i>Z 55</i>) жесткая смесь
<i>PR</i>	Быстротвердеющий цемент (<i>Z 55</i>) пластичная смесь
<i>RR</i>	Быстротвердеющий цемент (<i>Z 55</i>) литая смесь

В документе *DIN 4227* имеются некоторые противоречия в отношении напряжений соединения/сцепления. В главе 13 приведены значения, которые

достаточно хорошо соответствуют отношениям, приведенным в таблице 7 приложения А1. Но эти значения не соответствуют значениям, указанным в таблице 19 *DIN 1045*. Таким образом, разработчиками программы было принято решение увеличить значение параметра *FBD* для бетона *SB* в 1,43 раза. С этой поправкой данное значение может использоваться для расчета соединений в соответствии с главой. 13 нормативного документа *DIN 4227*.

Для описания прочностных свойств стандартного бетона используется параболически-прямоугольная диаграмма напряжений. По умолчанию значение параметра *SCM* равняется 1,00. Если пользователь проанализирует составные (композитные) сечения расчетной системы, то у него появится возможность изменить значение данного параметра. Высокопрочный бетон, ввиду своих прочностных свойств, имеет наименьшие конечные деформации.

3.13.3 Бетон в *ÖNORM B 4700 / B 4750*

Несмотря на то, что *OENORM B 4700* близок по содержанию к Еврокоду, в данном документе имеются некоторые отличия в классификации бетона по его кубиковой прочности *B*, что не скажешь про классификацию бетона по его цилиндрической прочности *C* – не изменилась относительно Еврокода. Поскольку обозначение прочности *C* соответствует *LC*, пользователю необходимо вводить команду *NORM OEN*.

B = качественный бетон, классифицируемый исходя из кубиковой прочности (*ÖNORM B 4700*)

LB = легкий бетон, классифицируемый исходя из кубиковой прочности (*ÖNORM B 4700*)

C = качественный бетон, классифицируемый исходя из цилиндрической прочности (*ÖNORM B 4700*)

LC = легкий бетон, классифицируемый исходя из цилиндрической прочности (*ÖNORM B 4700*)

По умолчанию значение параметра *FCN* равняется 25 или 20.

<i>FCN</i>	20.0	25.0	30.0	40.0	50.0
<i>FC</i>	15.0	18.8	22.5	30.0	37.5
<i>FCT</i>	19.0	2.2	2.6	3.0	3.5
<i>EC</i>	27500	29000	30500	32500	35000

Параметр *SCM* равен 1.5, а значение *FCTK* равняется $0.7 \cdot FCT$.

3.13.4 Бетон в швейцарских нормах *SIA*

Нормативный документ *SIA 262 (2003)* очень похож на Еврокоды, но с некоторыми отличиями (модель упругости *E*, прочность соединения/сцепления, функция зависимости напряжений и деформаций). С учетом данных отличий, бетон, как материал, классифицируется следующим образом:

- C* = стандартный бетон, классифицируемый исходя из цилиндрической прочности (*SIA 262*)
- LC* = легкий бетон, классифицируемый исходя из цилиндрической прочности (*SIA 262*)

Проектная прочность бетона рассчитывается согласно разделам 4.2.1.2 и 4.2.1.3 с учетом двух коэффициентов η_{fc} и η_t . Первый коэффициент применяется для определения значения параметра *FCN* автоматически. Так как второй коэффициент зависит от особенностей проектируемого сооружения, он может быть изменен, как это реализовано в Еврокоде, при помощи специального параметра 'boxed value' *ALF-CC* раньше или позже.

Модули упругости рассчитываются исходя из среднего значения прочности сооружения/элемента. Для легкого бетона значения прочности корректируются в зависимости от его удельного веса. Диаграмма зависимости напряжений и деформаций, по умолчанию, описывается соответствующей функцией, приведенной в *EC-2* (даже при расчете конструкции). Значение параметра *SCM* будет равняться 1.5.

$FCN = f_{ck}$	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck, cube} C$	15	20	25	30	37	45	50	55	60
$f_{ck, cube} LC$	13	18	22	28	33	38	44	50	55

3.13.5 Бетон в *French BAEL-99*

«Французская ассоциация по стандартизации» (*Association française de normalization – AFNOR*) издала нормативный документ (Технические правила проектирования и расчета железобетонных конструкций и сооружений на основе метода предельных состояний/*Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites*) с учетом уже используемого *BAEL 91*. Данный нормативный документ очень похож по содержанию на Еврокод, но, как и в предыдущих случаях, имеет некоторые отличия. Разработчиками программы была проведен пересмотр данного документа 1999 года.

Данный нормативный документ позволяет рассчитать нормативную прочность бетона, учитывая его возраст и расчетную прочность, исходя из продолжительности действия нагрузки t , которая определяется пользователем самостоятельно в зависимости от решаемой задачи. В результате имеем следующую последовательность расчетов:

$$\begin{aligned}
 FC &= 0.85/\Theta \cdot f_{ck} \\
 \Theta &= 1.00 && (t_l > 24 \text{ h}) \\
 \Theta &= 0.90 && (24\text{h} > t_l > 1 \text{ h}) \\
 \Theta &= 0.85 && (1\text{h} > t_l) \\
 FCT &= 0.6 + 0.06 \cdot f_{ck} && (f_{ck} < 60) \\
 &= 0.275 \cdot f_{ck}^{2/3} && (f_{ck} \geq 60) \\
 EC &= 11000 \cdot f_{ck}^{1/3} \\
 FBD &= 0.60 \cdot \Psi_s^2 \cdot f_{ct,0.05}/\gamma; \Psi_s = 1.5
 \end{aligned}$$

Свойства высокопрочного бетона класса до 80 определяется в приложении *F*. Данные типы бетона характеризуются измененной функцией зависимости напряжений и деформаций.

Существует также тип бетона *DUCT* для *UHPRFC Ductal FM*. Для определения функции зависимости напряжений и деформаций значение параметра *GF* определяется из отношения $w_{0.3}/l_c$.

3.13.6 Бетон в *Spanish EHE*

Испанские нормы проектирования *EHE* (Требования к бетонным конструкциям/*Instruccin de hormign estructural*) очень похожи на Еврокод. Все отличия, в основном, связаны с используемыми обозначениями, модулями упругости и самим методом расчета проектируемого сооружения.

HA = соотношение бетона и арматуры 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50

HP = предварительно напряженный бетон 25, 30, 35, 40, 45, 50

3.13.7 Бетона в *Swedish BBK*

Шведские нормы *BBK* содержат довольно высокие требования, касаясь коэффициентов запаса прочности, на которые влияет класс безопасности (см. *NORM*), а также отличия значений модулей упругости и прочности. В новой версии документа, выпущенного в 2004 году, теперь используются такие же обозначения, как и в *ЕС*, а требования к безопасности и прочности сооружения остались те же, что и в старой версии *BBK*. В результате изменений имеем следующее:

C = 16, 20, 25, 28, 30, 35, 40, 45, 50, 54, 55, 58, 60

LC = 8, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60

Поскольку в *ВБК* не указывается никаких подробностей, касаемо зон перехода материала из одного состояния в другое в процессе работы, пользователь имеет возможность влиять и изменять форму кривой напряжения-деформации при помощи параметра *FCR* в пределах от $0.6F_{CK}$ до $1.0F_{CK}$.

3.13.8 Бетона в *Danish DS 411*

Датские нормы *DS 411* содержат довольно высокие требования, касаемо коэффициентов запаса прочности, на которые влияет класс безопасности (см. *NORM*). Доступны следующие типы:

$$C = 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60$$

Для расчета модуля упругости *E* и прочности на растяжение в нормативном документе указаны конкретные формулы. При расчете разрешено использовать значения из прямоугольной эпюры напряжений, но по умолчанию программа использует данные из параболически-прямоугольной диаграммы, характеризующей зависимость напряжений и деформаций.

3.19.3 Бетон в *Norwegian NS 3473*

В норвежских нормах *NS* бетон классифицируется исходя из его цилиндрической прочности. Возможные значения: 20/25/30/35/45/55/65/75/85/95. Для легких бетонов (*LNS*) самым высоким классом прочности является 75.

3.13.10 Бетон в итальянских нормах проектирования

Нормативный документ «Государственный стандарт Италии/*Decreto Ministeriale Italiane*», изданный в 1996 году, также как и в «Техническом стандарте/*Norme Tecniche*», изданном в 2005 году, бетон классифицируют исходя

из его кубиковой прочности R_{ck} . Даже в версиях 2008 и 2018 годов используется данная классификация прочности бетона.

CAN = 2008/2018 качественный бетон, классифицируемый исходя из кубиковой прочности f_{wk} ($\gamma = 1.50$)

CAL = 2008/2018 легкий бетон, классифицируемый исходя из цилиндрической прочности f_{wk} ($\gamma = 1.50$)

CAN = 1996 качественный бетон, классифицируемый исходя из кубиковой прочности R_{ck} ($\gamma = 1.60$)

CAP = 1996 преднапряженный бетон, , классифицируемый исходя из кубиковой прочности R_{ck} ($\gamma = 1.50$)

По умолчанию программой используются следующие значения проектной прочности и модуля упругости:

$$FC = 0.83 \cdot 0.85 \cdot R_{ck} \quad (1996) = 0.85 \cdot f_{ck} \quad (2008)$$

$$FCT = 0.27 \cdot R_{ck}^{2/3} \quad (1996) = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (2008)$$

$$EC = 5700 \cdot R_{ck}^{1/2} \quad (1996) = 22000 \cdot (f_{cm}/10)^{0.3} \quad (2008)$$

$$FBD = 2.25 \cdot f_{ct,0.05} / \gamma$$

3.13.11 Бетон в британских нормах проектирования *BS 8110*

Используется следующий тип бетона:

BS = обычный бетон из *BS 8110*

Номинальная прочность FCN бетона определяется кубиковой прочностью. Проектная прочность рассчитывается по следующей формуле:

$$FC = 0.67 FCN \quad (3.117)$$

В британских нормах используется параболически-прямоугольная кривая зависимости напряжений и деформаций, начиная с описания расчетной кубиковой прочности $\beta = FC/0.67$ с деформацией $0.24\sqrt{\beta}$ при полной пластичности и с

первоначальной жесткостью $5.5\sqrt{\beta}$ в соответствии с рисунком 2.1 (см. *BS 8110*). Коэффициент запаса *SCM* равняется 1.5. Для таблицы 3.28, приведенной в *BS 8110*, прочность соединения/сцепления будет иметь нефизическое максимальное значение, равное $\sqrt{f_c}$.

Для Гонконга были выбраны британские нормы проектирования с кодом страны 852 с учетом небольших изменений. В данном случае первоначальная жесткость будет равна $5.0\sqrt{\beta}$.

3.13.12 Бетон в *ACI 318M* (Американский институт бетона/*American Concrete Institute*)

Каждый класс бетона имеет определенную прочность на сжатие f'_c , измеряемая в МПа:

ACI = обычный бетон из *ACI 318M*

Экспериментальные значения цилиндрической прочности бетона должны превышать значение прочности соответствующего класса бетона на определенную величину исходя из стандартного отклонения (среднеквадратическая погрешность). В главе 5.3 *ACI 318M* приведены предварительные значения для требуемого отклонения, равные 7.0, 8.5 и 10.0 МПа для значений прочности f'_c до 21, а также до 35 и выше.

Так как значение $\sqrt{f'_c}$ не должно, в общем, превышать значение 25/3 МПа в общем случае, а при расчете легкого бетона требуется применять различные понижающие коэффициенты, то для определения значения $\sqrt{f'_c}$ необходимо использовать значение растягивающего напряжения. Предел прочности при изгибе или кручении f_r является верхним квантилем прочности материала на растяжение. Данный параметр в соответствии с *ACI* (п.п. 9.5.2.3) определяется по следующей формуле:

$$f_r = 0.75 \cdot \sqrt{f'_c} < 0.75 \cdot 25/3 \quad (3.118)$$

Для легкого бетона:

$$f_r = 0.70 \cdot \min(\sqrt{f_c'}, 1.8 \cdot f_{ct-m})$$
$$f_r = 0.70 \cdot 0.75 \cdot \sqrt{f_c'}$$
(3.119)

Таким образом, отношение квантилей равно 1.26. Среднее значение f_{ct-m} будет равняться $0.5 \cdot \sqrt{f_c'}$. Все остальные значения будут получены из этого значения с учетом коэффициента. При необходимости может быть задан нижний квантиль, который затем станет верхним пределом значения. Данная возможность используется только в тех случаях, когда в расчетной формуле используется определенное (явное) значение параметра f_r .

Согласно п.п. 12.2 из документа *ACI 318* прочность соединения (сцепления) будет иметь нефизическое максимальное значение, равное $\sqrt{f_c}$.

3.13.13 Бетон в бразильских нормах *NBR 6118-2003*

Для детального анализа ползучести и усадки бетона, исходя из требований, изложенных в *NBR NM 67*, бетон классифицируется по типу цемента, подвижности (консистенции) смеси и классу прочности:

<i>KS</i>	Нормальный цемент (<i>CP I</i> и <i>CP II</i>) жесткая смесь (0-4 см)
<i>KP</i>	Нормальный цемент (<i>CP I</i> и <i>CP II</i>) пластичная смесь (5-9 см) по умолчанию
<i>KR</i>	Нормальный цемент (<i>CP I</i> и <i>CP II</i>) литая смесь (10-15 см)
<i>SL</i>	Медленнотвердеющий цемент (<i>CP III</i> и <i>CP IV</i>) жесткая смесь
<i>PL</i>	Медленнотвердеющий цемент (<i>CP III</i> и <i>CP IV</i>) пластичная смесь
<i>RL</i>	Медленнотвердеющий цемент (<i>CP III</i> и <i>CP IV</i>) литая смесь
<i>SR</i>	Быстротвердеющий цемент (<i>CP V-ARI</i>) жесткая смесь
<i>PR</i>	Быстротвердеющий цемент (<i>CP V-ARI</i>) пластичная смесь
<i>RR</i>	Быстротвердеющий цемент (<i>CP V-ARI</i>) литая смесь

Модули упругости рассчитывается по формуле $E_{ci} = 5600 \cdot f_{ck}^{1/2}$ и $E_{cs} = 0.85E_{ci}$. График работы материала имеет вид параболически-прямоугольной диаграммы, в которой прочность при растяжении рассчитывается из условия $0.85f_{cd}$, а остальные прочностные характеристики рассчитываются по следующим формулам: $f_{ct,m} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3}$; $f_{ct,kinf} = 0.7 \cdot f_{ct,m}$; $f_{ct,sup} = 1.3 \cdot f_{ct,m}$. Прочность соединения рассчитывает по формуле $f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctk,inf}/\gamma_c$; $\eta_1 = 2.25$.

3.13.14 Бетон в австралийских AS 3600 и новозеландских NZS 3101 нормах

Команда *TYPE AS* или *TYPE NZS* позволяет выбрать тот или иной государственный стандарт, опираясь на который впоследствии и будут производиться необходимые расчеты, и приняты проектные решения. Нормативную прочность бетона на сжатие (то есть 20, 25, 32, 40, 50 или 65 МПа) можно вводить при помощи параметра *FCN* (например, *CONC TYPE AS FCN 50*). В настоящее время только при использовании данных нормативных документов (*AS* и *NZS*) в расчетной системе уже будут известны конкретные значения свойств материала. Модуль упругости материала является функцией среднестатистического значения возникающего усилия, учет которого не предусмотрен в данных государственных стандартах проектирования. Учитывая данный факт, для расчета модуля упругости пользователь может использовать методику, изложенную в *ЕС*.

3.13.15 Бетон в китайских нормах

Согласно *GB 50010-2002* используется следующий тип бетона:

GB = обычный и высокопрочный бетон

Нормативная прочность FCN (от 15 МПа до 80 МПа) и проектная прочность берутся из таблицы 4.1.3.4. Модуль Юнга взят из таблицы 4.1.5.

3.13.16 Бетон в индийских нормах *IS/IRC*

С момента издания документа *IRC 112* был разработан и выпущен совершенно новый нормативный документ, который в значительной степени ссылается на Еврокод *EN 1992*. Нормативная прочность FCN теперь характеризуется цилиндрической прочностью материала. Однако в значениях коэффициентов имеются значительные отличия, не все из которых рассмотрены в данном руководстве. Например, среднее значение прочности f_{cm} определяется по формуле $f_{ck} + 10$, а прочность на растяжение примерно на 13% меньше полученного значения. Более подробную информацию вы можете найти в главе по Еврокоду.

3.13.17 Бетон в российских нормах *СНиП*

В данном нормативном документе приводится широкий диапазон классификаций бетона. Учитывая данный факт, пользователю в некоторых случаях необходимо ввести конкретные значения для некоторых свойств. Особенно это касается значений коэффициентов запаса по нагрузке, которые зависят от внешних условий (окружающей среды) и, которое не устанавливаются исходя из выбранного материала.

SNIP Классификация прочности бетона на сжатие (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 МПа), взятая из старого документа *СНиП 2.03.01*, с возможным увеличением класса прочности:

T термообработка

TW термообработка в автоклаве

A бетон с мелким заполнителем – группа *A* (размер частиц > 2.0)

AT термообработка бетона группы *A*

B бетон с мелким заполнителем – группа *B* (размер частиц < 2.0)

BT термообработка бетона группы *B*

W бетон с мелким заполнителем в автоклаве

LISNI

Для учета пористости (*'porous'*) легкого бетона при задании прочности на сжатие достаточно к классу прочности подставить параметр *P*

Прочность бетона на сжатие и растяжение выбирается в соответствии с таблицами 5.1-5.3. Модуль упругости берется из таблицы 5.4. В современном своде правил СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» вся информация по прочностным свойствам бетона изложена в п.п. 6.1 приведенного нормативного документа.

3.13.18 Линейно упругий бетон

Бетон типа *CE* характеризуется, как линейно упругий материал без наличия растягивающих усилий (напряжений). Данные условия работы материала могут быть использованы при анализе распределения напряжений в фундаменте или при расчете системы по допускаемым напряжениям, как в старых стандартах. В таких случаях параметр *FC* характеризует допустимое сжимающее напряжение. Модуль упругости бетона при данном виде зависимости напряжений и деформаций (линейная зависимость) в большинстве случаев должен быть меньше значения *EC* и может быть введен в систему при помощи параметра *ECR*.

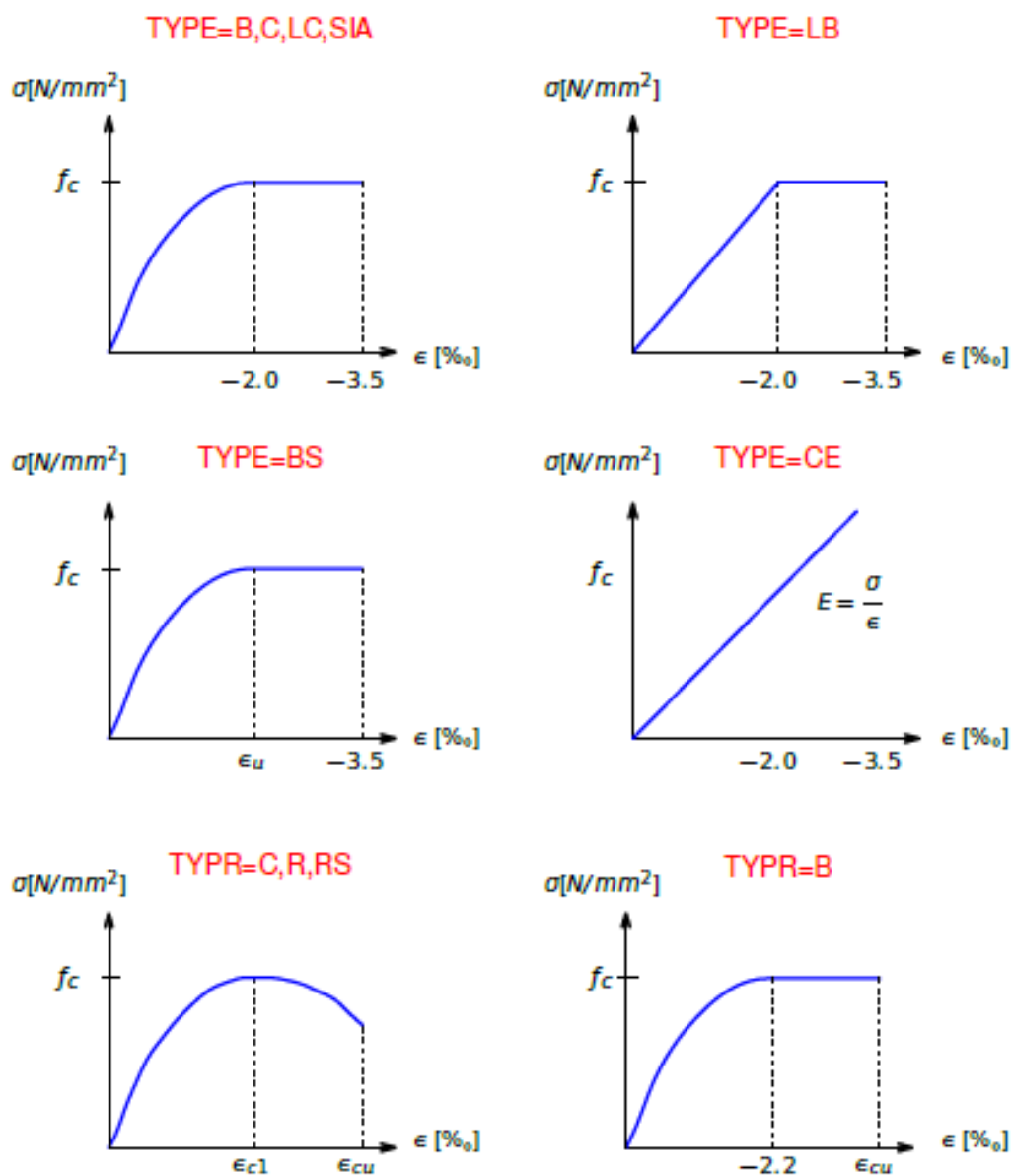


Рис. 3.23 – Графики зависимости напряжений и деформаций для различных типов бетона

3.14 STEE – Свойства металла

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала (1-999)	-	1
<i>TYPE</i>	Тип материала (см. примечание): <i>S</i> Конструкционная сталь <i>B</i> Арматура <i>Y</i> Напрягаемая арматура <i>AL</i> Алюминиевый сплав	<i>LIT</i>	*
<i>CLAS</i>	Класс стали или ее качество	*	*
<i>FY</i>	Предел текучести ($f_{0.01}$ или $f_{0.02}$)	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FT</i>	Прочность на растяжение	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FP</i>	Предел упругости	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>ES</i>	Модуль упругости	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>MUE</i>	Коэффициент Пуассона или модуль упругости при сдвиге	-	0,30
<i>GAM</i>	Объемный вес	[кН/м ³] ₁₀₉₁	*
<i>ALFA</i>	Коэффициент температурного расширения	[1/К] ₁₀₈₃	*
<i>SCM</i>	Типовой коэффициент запаса прочности материала		*
<i>EPSY</i>	Постоянная деформация при пределе текучести <i>FY</i>	o/ oo	*
<i>EPST</i>	Предельное значение деформации ϵ_{uk}	o/ oo	*
<i>REL1</i>	Коэффициент релаксации ($0.70f_{pk}$)	%	*
<i>REL2</i>	Коэффициент релаксации ($0.55f_{pk}$)	<i>LIT</i> /%	0
<i>R</i>	Относительная прочность соединения/сцепления	-	*
<i>K1</i>	Коэффициент соединения/сцепления при ширине трещины согласно <i>EN 1992</i>	-	0.8/R

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>FDYN</i>	Допустимый диапазон напряжений	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FYC</i>	Предел текучести при сжатии ($f_{0.02}$)	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	<i>FY</i>
<i>FTC</i>	Прочность на сжатие	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	<i>FT</i>
<i>TMAX</i>	Максимальная толщина плиты	[мм] ₁₀₂₅	*
<i>GMOD</i>	Модуль упругости при сдвиге	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>KMOD</i>	Объемный модуль упругости	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>TITL</i>	Наименование/обозначение материала	<i>Lit32</i>	*

Имеются некоторые достаточно строгие требования по использованию того или иного типа стали. Конструкционные типы сталей (например, *S 235*, *ST*, *AL* и т. д.) могут использоваться только при создании поперечных сечений элементов, а предварительно напрягаемая арматура используется для ввода в систему армирования элемента, кабельных элементов и арматурных пучков.

3.14.1 Конструкционная сталь

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
Еврокод: <i>EN 1993-1-1</i> Таблица 3.1	$t \leq 40$ мм						
<i>S 235</i>	235	360	-	-	-	210000	78.5
<i>S 375</i>	375	430	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355</i>	355	490	-	-	-	210000	78.5
<i>S 450</i>	440	550	-	-	-	210000	78.5
<i>S 275N</i>	275	390	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355N</i>	355	490	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>S 420N</i>	420	520	-	-	-	210000	78.5
<i>S 460N</i>	460	540	-	-	-	210000	78.5
<i>S 275M</i>	275	370	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355M</i>	355	470	-	-	-	210000	78.5
<i>S 420M</i>	420	520	-	-	-	210000	78.5
<i>S 460M</i>	460	540	-	-	-	210000	78.5
<i>S 235W</i>	235	360	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355W</i>	355	490	-	-	-	210000	78.5
<i>S 460Q</i>	460	570	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
Еврокод: <i>EN 1993-1-1</i>							
Таблица 3.1	$40 < t < 80$ мм						
<i>S 235T</i>	215	360	-	-	-	210000	78.5
<i>S 375T</i>	255	410	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355T</i>	335	470	-	-	-	210000	78.5
<i>S 450T</i>	410	550	-	-	-	210000	78.5
<i>S 275NT</i>	255	370	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355NT</i>	335	470	-	-	-	210000	78.5
<i>S 420NT</i>	390	520	-	-	-	210000	78.5
<i>S 460NT</i>	430	540	-	-	-	210000	78.5
<i>S 275MT</i>	255	360	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355MT</i>	335	450	-	-	-	210000	78.5
<i>S 420MT</i>	390	500	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>S 460MT</i>	430	530	-	-	-	210000	78.5
<i>S 235WT</i>	215	340	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355WT</i>	335	470	-	-	-	210000	78.5
<i>S 460QT</i>	440	550	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
Еврокод: <i>EN 10025-6</i>	<i>TMAX ...</i>						
<i>S 500Q</i>	*)	*)	-	-	-	210000	78.5
<i>S 550Q</i>	*)	*)	-	-	-	210000	78.5
<i>S 620Q</i>	*)	*)	-	-	-	210000	78.5
<i>S 690Q</i>	*)	*)	-	-	-	210000	78.5
<i>S 890Q</i>	*)	*)	-	-	-	210000	78.5
<i>S 960Q</i>	*)	*)	-	-	-	210000	78.5
*) Значения свойств материала зависят от максимальной толщины плиты <i>TMAX</i>							

Для конструкционной стали, при вводе значений свойств для которой нужно руководствоваться нормативными документами от *EN 10025-2* до *EN 10025-6*, необходимо ввести в систему толщину пластины *TMAX*. Пример ввода выглядит следующим образом:

STEE 1 S 355 TMAX 80

STEE 2 S 355M TMAX 100

Первая запись характеризует предельные значения жесткости для конструкционной стали *S 355* в соответствии с документом *EN 10025-2* при толщине плиты $63 \text{ мм} < t \leq 80 \text{ мм}$. Вторая запись характеризует предельные значения жесткости для конструкционной стали качества *355M* в соответствии с документом *EN 10025-3* при толщине плиты $80 \text{ мм} < t \leq 100 \text{ мм}$.

ПРИМЕЧАНИЕ: В приложениях разных государственных стандартов значения свойств материала могут быть указаны по-разному.

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>DIN:</i>							
<i>ST 33</i>	190	330	-	-	-	210000	78.5
<i>ST 37</i>	240	370	-	-	-	210000	78.5
<i>ST 52</i>	360	520	-	-	-	210000	78.5
<i>TMAX 40 (t ≤ 40 мм)</i>					-		
* <i>S 235</i>	240	360	-	-	-	210000	78.5
<i>S 275</i>	275	430	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355</i>	360	510	-	-	-	210000	78.5
<i>S 460</i>	460	600	-	-	-	210000	78.5
<i>TMAX 80 / 100 (40 < t ≤ 80/100 мм)</i>							
* <i>S 235</i>	215	340	-	-	-	210000	78.5
<i>S 275</i>	255	410	-	-	-	210000	78.5
<i>S 355</i>	335	490	-	-	-	210000	78.5
* <i>GU 52</i>	260	520	-	-	-	100000	72.5
<i>GU 17</i>	240	370	-	-	-	210000	72.5
<i>GU 20</i>	300	500	-	-	-	210000	72.5
<i>GU 200</i>	200	380	-	-	-	210000	72.5
<i>GU 240</i>	240	450				210000	72.5
<i>GU 400</i>	250	390				169000	72.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>OENORM:</i>							
<i>ST 44</i>	285	430	-	230	-2	206000	78.5
<i>ST 55</i>	355	540	-	285	-2	206000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>SIA:</i>							
	<i>TMAX 40 (t ≤ 40 mm)</i>						
<i>*S 235</i>	235	360				210000	78.5
<i>S 275</i>	275	430				210000	78.5
<i>S 355</i>	355	510				210000	78.5
<i>S 460</i>	460	550				210000	78.5
	<i>TMAX 100 (40 < t ≤ 100 mm)</i>						
<i>S 235</i>	215	340				210000	78.5
<i>S 275</i>	255	410				210000	78.5
<i>S 355</i>	335	490				210000	78.5
<i>S 460</i>	430	530				210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>British</i>							
<i>Standard:</i>							
	<i>TMAX 16 (t ≤ 16 mm)</i>						
<i>BS 275</i>	275	430			-	205000	78.5
<i>BS 355</i>	355	500	-	-	-	205000	78.5
<i>BS 460</i>	460	550	-	-	-	205000	78.5
	<i>TMAX 40 (16 < t ≤ 40 mm)</i>						
<i>BS 275</i>	265	430			-	205000	78.5
<i>BS 355</i>	345	500	-	-	-	205000	78.5
<i>*BS 460</i>	440	550	-	-	-	205000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
	<i>TMAX 63 (40 < t ≤ 63 mm)</i>						
<i>BS 275</i>	255	430			-	205000	78.5
<i>BS 355</i>	335	500	-	-	-	205000	78.5
<i>BS 460</i>	430	550	-	-	-	205000	78.5
	<i>TMAX 80 (63 < t ≤ 80 mm)</i>						
<i>BS 275</i>	245	430			-	205000	78.5
<i>BS 355</i>	325	500	-	-	-	205000	78.5
<i>BS 460</i>	410	550	-	-	-	205000	78.5
	<i>TMAX 100 (80 < t ≤ 100 mm)</i>						
<i>BS 275</i>	235	430			-	205000	78.5
<i>BS 355</i>	315	500	-	-	-	205000	78.5
<i>BS 460</i>	400	550	-	-	-	205000	78.5
	<i>TMAX 150 (100 < t ≤ 150 mm)</i>						
<i>BS 275</i>	225	430			-	205000	78.5
<i>BS 355</i>	295	500	-	-	-	205000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>EA:</i>							
<i>EA 37</i>	235	360	-	-	-	210000	78.5
<i>EA 42</i>	275	430	-	-	-	210000	78.5
<i>EA 52</i>	355	510	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>BSK:</i>	<i>TMAX 16 (t ≤ 16 mm)</i>						
<i>BSK 235</i>	235	340			-	210000	78.5
<i>BSK 275</i>	275	410			-	210000	78.5
<i>BSK 355</i>	355	490	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355N</i>	355	470	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355M</i>	355	450	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 420</i>	420	500	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 460</i>	460	530	-	-	-	210000	78.5
	<i>TMAX 40 (16 < t ≤ 40 mm)</i>						
<i>BSK 235</i>	225	340			-	210000	78.5
<i>BSK 275</i>	265	410			-	210000	78.5
<i>BSK 355</i>	345	490	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355N</i>	345	470	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355M</i>	345	450	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 420</i>	400	500	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 460</i>	440	530	-	-	-	210000	78.5
	<i>TMAX 63 (40 < t ≤ 63 mm)</i>						
<i>BSK 235</i>	255	410			-	210000	78.5
<i>BSK 355</i>	335	490	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355N</i>	335	470	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355M</i>	335	450	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 420</i>	420	500	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 460</i>	430	530	-	-	-	210000	78.5
	<i>TMAX 80 (63 < t ≤ 80 mm)</i>						
<i>BSK 275</i>	245	410			-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>BSK 355</i>	325	490	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355N</i>	325	470	-	-	-	210000	78.5
<i>TMAX 100 (80 < t ≤ 100 mm)</i>							
<i>BSK 235</i>	215	340			-	210000	78.5
<i>BSK 275</i>	235	410			-	210000	78.5
<i>BSK 355</i>	315	490	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK 355N</i>	315	470	-	-	-	210000	78.5
<i>BSK</i>	<i>TMAX 50 (t ≤ 50 mm)</i>						
<i>BS 460Q</i>	460	550	-	-	-	210000	78.5
<i>BS 500Q</i>	500	590			-	210000	78.5
<i>BS 550Q</i>	550	640	-	-	-	210000	78.5
<i>BS 620Q</i>	620	700	-	-	-	210000	78.5
<i>BS 690Q</i>	690	770	-	-	-	210000	78.5
<i>TMAX 100 (50 < t ≤ 100 mm)</i>							
<i>BS 460Q</i>	440	550	-	-	-	210000	78.5
<i>BS 500Q</i>	480	590			-	210000	78.5
<i>BS 550Q</i>	530	640	-	-	-	210000	78.5
<i>BS 620Q</i>	580	700	-	-	-	210000	78.5
<i>BS 690Q</i>	650	760	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>NS:</i>	<i>TMAX 40 (16 < t ≤ 40 mm)</i>						
<i>NS 235</i>	235	360			-	210000	78.5
<i>NS 275</i>	275	430			-	210000	78.5
<i>NS 275N</i>	275	390			-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>NS 275M</i>	275	380			-	210000	78.5
<i>NS 355</i>	355	510	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 355N</i>	355	490	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 355M</i>	355	470	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 420N</i>	420	540	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 420M</i>	420	520	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 460N</i>	460	570	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 460M</i>	460	550	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 460Q</i>	460	570	-	-	-	210000	78.5
<i>TMAX 80(40 < t ≤ 80 mm)</i>							
<i>NS 235</i>	215	340			-	210000	78.5
<i>NS 275</i>	255	410			-	210000	78.5
<i>NS 275N</i>	235	370			-	210000	78.5
<i>NS 275M</i>	255	360			-	210000	78.5
<i>NS 355</i>	335	490	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 355N</i>	335	470	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 355M</i>	335	450	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 420N</i>	390	520	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 420M</i>	390	500	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 460N</i>	430	550	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 460M</i>	430	530	-	-	-	210000	78.5
<i>NS 460Q</i>	440	550	-	-	-	210000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>DM-96:</i>	<i>TMAX 40 (t ≤ 40 mm)</i>						
<i>FEI 360</i>	235	360	-	-	-	206000	78.5
<i>FEI 430</i>	275	430	-	-	-	206000	78.5
<i>FEI 510</i>	355	510	-	-	-	206000	78.5
	<i>TMAX 63,80,100 (t > 40 mm)</i>						
<i>FEI 360</i>	210	340	-	-	-	206000	78.5
<i>FEI 430</i>	250	410	-	-	-	206000	78.5
<i>FEI 510</i>	315	490	-	-	-	206000	78.5
	<i>TMAX 40 (t ≤ 40 mm)</i>						
<i>FEG 400</i>	180		-	-	-	206000	78.5
<i>FEG 430</i>	225		-	-	-	206000	78.5
<i>FEG 520</i>	255		-	-	-	206000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>MSZ:</i>							
<i>S 37</i>	230	370	-	200	-	206000	78.5
<i>S 45</i>	290	450	-	240	-	206000	78.5
<i>S 52</i>	350	520	-	280	-	206000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>AISC/ASTM:</i>							
<i>A 36</i>	250	400				200000	78.5
<i>A 42</i>	290	415					
<i>A 50</i>	345	450					
<i>A 53</i>	240	415					
<i>A 290</i>	290	415					

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>A 345</i>	345	450					
<i>A 415</i>	415	520					
<i>A 450</i>	450	550					
<i>A 500A</i>	230	310					
<i>A 500B</i>	290	400					
<i>A 500C</i>	315	425					
<i>A 500D</i>	250	400					
<i>A 514</i>	689	758	<i>(TMAX 63, 152 MM)</i>				
<i>A 517</i>	689	793	<i>(TMAX 63, 152 MM)</i>				
<i>A 242</i>	340	480	<i>(CORE-TEN, TMAX 19, 25, 102 MM)</i>				
<i>A 588</i>	340	480	<i>(CORE-TEN, TMAX 4, 6, 8 MM)</i>				
<i>A 992</i>	345	450					
<i>A 70W</i>	485	586					
<i>A 100W</i>	690	760					

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>ABNT:</i>							
<i>NBR 250</i>	250	400				205000	78.5
<i>NBR 45</i>	350	450				205000	78.5
<i>NBR 52</i>	415	520				205000	78.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>Australian:</i>	Листовая сталь и сечения:						
<i>AS 400</i>	400	520	<i>TMAX 17</i> ($0 < t \leq 17$ мм)				
<i>AS 400</i>	380	520	<i>TMAX 100</i> ($17 < t \leq 100$ мм)				
<i>AS 350</i>	360	480	<i>TMAX 11</i> ($0 < t \leq 11$ мм)				
* <i>AS 350</i>	340	480	<i>TMAX 40</i> ($11 < t \leq 40$ мм)				
<i>AS 350</i>	330	480	<i>TMAX 100</i> ($40 < t \leq 100$ мм)				
<i>AS 300</i>	320	440	<i>TMAX 11</i> ($0 < t \leq 11$ мм)				
<i>AS 300</i>	300	440	<i>TMAX 17</i> ($11 < t \leq 17$ мм)				
* <i>AS 300</i>	280	440	<i>TMAX >17</i> (17 мм $< t$)				
<i>AS 250</i>	260	410	<i>TMAX 11</i> ($0 < t \leq 11$ мм)				
<i>AS 250</i>	250	410	<i>TMAX 40</i> ($11 < t \leq 40$ мм)				
<i>AS 250</i>	230	410	<i>TMAX >40</i> (40 мм $< t$)				
	Шестиугольные, круглые и квадратные сечения:						
<i>AS 400</i>	400	520	<i>TMAX 50</i> ($0 < t \leq 50$ мм)				
<i>AS 400</i>	380	520	<i>TMAX 100</i> ($50 < t \leq 100$ мм)				
<i>AS 400</i>	360	520	<i>TMAX >100</i> (100 мм $< t$)				
<i>AS 350</i>	340	480	<i>TMAX 50</i> ($0 < t \leq 50$ мм)				
* <i>AS 350</i>	330	480	<i>TMAX 100</i> ($50 < t \leq 100$ мм)				
<i>AS 350</i>	320	480	<i>TMAX >100</i> (100 мм $< t$)				
<i>AS 300</i>	300	440	<i>TMAX 50</i> ($0 < t \leq 50$ мм)				
<i>AS 300</i>	280	440	<i>TMAX 100</i> ($50 < t \leq 100$ мм)				
* <i>AS 300</i>	260	440	<i>TMAX >100</i> (100 мм $< t$)				
<i>AS 250</i>	250	410	<i>TMAX 50</i> ($0 < t \leq 50$ мм)				
<i>AS 250</i>	230	410	<i>TMAX >50</i> (50 мм $< t$)				

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>JIS:</i>							
<i>JIS 400</i>	235	400	<i>TMAX 40</i> ($t \leq 40$ мм)		200000	77.0	
<i>400</i>	215	400	<i>TMAX 100</i> ($40 < t \leq 100$ мм)				
	(SS 400, SM 400 и идентичная SMA 400W)						
<i>JIS 490</i>	315	490	<i>TMAX 40</i>		200000	77.0	
<i>490</i>	295	490	<i>TMAX 100</i> ($40 < t \leq 100$ мм)				
<i>JIS 520</i>	355	520	<i>TMAX 40</i>		200000	77.0	
<i>520</i>	335	520	<i>TMAX 75</i> ($40 < t \leq 75$ мм)				
<i>520</i>	325	520	<i>TMAX 100</i> ($75 < t \leq 100$ мм)				
	(SM 520, SM 490Y и идентичная SMA 490W)						
<i>JIS 570</i>	450	520	<i>TMAX 40</i>		200000	77.0	
<i>570</i>	430	530	<i>TMAX 75</i> ($40 < t \leq 75$ мм)				
<i>570</i>	420	530	<i>TMAX 100</i> ($75 < t \leq 100$ мм)				

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>IS/IRC:</i>							
<i>IS 250</i>	250	250				211000	77.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>GB:</i>	<i>GB 50017-2003</i>						
<i>Q 235</i>	215	360	<i>TMAX 16</i>		210000	78.5	
<i>235</i>	215		<i>TMAX 40</i> ($16 < t \leq 40$ мм)				
<i>235</i>	200		<i>TMAX 60</i> ($40 < t \leq 60$ мм)				
<i>235</i>	190		<i>TMAX 100</i> ($60 < t \leq 100$ мм)				

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
<i>Q 345</i>	310	490	<i>TMAX 16</i>			210000	78.5
<i>345</i>	295		<i>TMAX 35(16 < t ≤ 35 мм)</i>				
<i>345</i>	265		<i>TMAX 50(35 < t ≤ 50 мм)</i>				
<i>345</i>	250		<i>TMAX 100(50 < t ≤ 100 мм)</i>				
<i>Q 390</i>	350	520	<i>TMAX 16</i>			210000	78.5
<i>390</i>	335		<i>TMAX 35(16 < t ≤ 35 мм)</i>				
<i>390</i>	315		<i>TMAX 50(35 < t ≤ 50 мм)</i>				
<i>390</i>	295		<i>TMAX 100(50 < t ≤ 100 мм)</i>				
<i>Q 420</i>	380	570	<i>TMAX 16</i>			210000	78.5
<i>420</i>	360		<i>TMAX 35(16 < t ≤ 35 мм)</i>				
<i>420</i>	340		<i>TMAX 50(35 < t ≤ 50 мм)</i>				
<i>420</i>	325		<i>TMAX 100(50 < t ≤ 100 мм)</i>				

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
СНиП:	СП 52-102 (Табл. В5) / СНиП II-23-81, 2 (Табл. 5.1)						
<i>C 235</i>	230	350	<i>TMAX 20</i>			206000	78.5
<i>235</i>	220	350	<i>TMAX 40(20 < t ≤ 40 мм)</i>				
<i>C 245</i>	240	360	<i>TMAX 20</i>			206000	78.5
<i>245</i>	230	360	<i>TMAX 30(20 < t ≤ 30 мм)</i>				
<i>C 255</i>	240	360	<i>TMAX 20</i>			206000	78.5
<i>255</i>	230	360	<i>TMAX 40(20 < t ≤ 40 мм)</i>				
<i>C 275</i>	270	370	<i>TMAX 10</i>			206000	78.5
<i>275</i>	260	360	<i>TMAX 20(10 < t ≤ 20 мм)</i>				

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>
C 285	270	380	<i>TMAX 10</i>			206000	78.5
285	260	370	<i>TMAX 20(10 < t ≤ 20 мм)</i>				
C 345	315	460	<i>TMAX 20</i>			206000	78.5
345	305	450	<i>TMAX 40(20 < t ≤ 40 мм)</i>				
C 345	280	440	<i>TMAX 80 (40 < t ≤ 80 мм)</i>				
345	260	420	<i>TMAX 100(80 < t ≤ 100 мм)</i>				
C 345K	335	460	<i>TMAX 10(4 < t ≤ 10 мм)</i>			206000	78.5
C 375	345	480	<i>TMAX 20</i>			206000	78.5
375	325	470	<i>TMAX 40(20 < t ≤ 40 мм)</i>				
C 390	380	525	<i>TMAX 50(4 < t ≤ 50 мм)</i>			206000	78.5
C 440	430	575	<i>TMAX 30 (4 < t ≤ 30 мм)</i>			206000	78.5
440	400	555	<i>TMAX 50(30 < t ≤ 50 мм)</i>				
C 590	575	670	<i>TMAX40(10 < t ≤ 30 мм)</i>			206000	78.5

Та часть наименования марки стали, которая прописана курсивом (например, *T*, *T8*, *4*), обозначает ее толщину. Данный параметр вводится в расчетную систему пользователем собственноручно при помощи системного языка программирования *CADINP*.

Значения прочности, особенно для высокопрочных сталей, могут варьироваться в зависимости от производителя и используемого сплава. Во избежание возникновения ошибок при расчете системы настоятельно рекомендуется проверить истинные значения характеристик стали с системными значениями, установленные в программе по умолчанию.

Максимально допустимая толщина пластины может быть введена в систему при помощи параметра *TMAX*, а значение параметра прочности определяется исходя из выбранного государственного стандарта. Так как при решении некоторых задач в процессе проектирования системы различные значения прочности одного сечения могут приводить к проблемам согласованности, было принято решение о применении единого метода расчета, исходя из максимально допустимого значения толщины элемента. Данный расчетный параметр будет проверяться в процессе генерации сечений. Для непосредственного учета максимальной толщины пластинчатого элемента для большинства марок сталей в программе имеется возможность добавить соответствующий дополнительный идентификатор.

ПРИМЕЧАНИЕ: Значение максимальной толщины также может быть использовано как регулирующий параметр при условии, если расчет составного сечения осуществляется с помощи параметра *DESI* модуля *AQB*. Данная возможность позволяет смоделировать процесс перехода деформаций, возникающих при сжатии, за границу предела текучести композитного материала. Для сечений 3 и 4 классов эта граница учитывается программой по умолчанию. Для сечений 1 или 2 класса возникающие в процессе работы элемента деформации не ограничены никаким пределом – *TMAX 0.0*.

Коэффициент запаса *SCM* – это параметр, используемый для расчетной проверки элементов расчетной системы. (γ_{MI} в соответствии с *EN 1993-1-1*). Данный коэффициент устанавливается в соответствии с выбранным материалом и нормами проектирования, и будет использоваться для расчета усилий, возникающих в стальных и композитных сечениях. Изменение значения коэффициента запаса в процессе разработки расчетной системы невозможно. Для обеспечения прочности сечений в расчетной системе ($\gamma_{Mo} = 1.0$ в соответствии с *EN 1993-1-1*) следует использовать соответствующие значения коэффициентов.

При использовании российских государственных стандартов стали значения расчетных характеристик устанавливаются программой по умолчанию в

соответствии с проверочным расчетом, приведенным в ГОСТ 27771 ($\gamma = 1.025$). Эти значения практически идентичны тем, которые приведены в старой версии СНиПа, однако, в последней версии нормативного документа прописаны более строгие, в плане допуска, значения для более тонких элементов. Значения расчетных характеристик элементов из прокатной стали выведены в отдельный столбец таблицы. Все эти дополнительные значения должны быть введены пользователем самостоятельно.

3.14.2 Алюминиевый сплав

	<i>F_Y</i>	<i>F_T</i>	<i>EPST</i>	<i>BC</i>	<i>np</i>	<i>TMAX</i>
<i>AWP 3004</i>	180.	220	10	<i>B</i>	23	6.0
<i>AWP 3005</i>	150.	170	10	<i>B</i>	38	6.0
<i>AWP 3103</i>	120.	140	20	<i>B</i>	31	25.0
<i>AWP 5005</i>	95.	125	20	<i>B</i>	25	12.5
<i>AWP 5052</i>	160..	210	40	<i>B</i>	17	40.0
<i>AWP 5049</i>	190.	240	30	<i>B</i>	20	25.0
<i>AWP 5454</i>	220.	270	20	<i>B</i>	22	25.0
<i>AWP 5754</i>	190.	240	30	<i>B</i>	20	25.0
<i>AWP 5083</i>	250.	305	30	<i>B</i>	22	40.0
<i>AWP 6061T4</i>	110.	250	120	<i>A</i>	23	12.5
<i>AWP 6061T6</i>	240	290	60	<i>B</i>	23	12.5/80.0
<i>AWP 6082T4</i>	110.	205	120	<i>A</i>	25	12.5
<i>AWP 6082T6</i>	240	295	60	<i>B</i>	25	6.0/12.5/100.0
<i>AWP 7020T6</i>	280.	350	90	<i>A</i>	19	12.5
<i>AWP 8011</i>	110	125	20	<i>B</i>	37	12.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>BC</i>	<i>np</i>	<i>TMAX</i>
<i>AWP 6060T5</i>	120.	160	80	<i>B</i>	14	5.0/25.0
<i>AWP 6060T6</i>	140.	170	80	<i>A</i>	16	15.0
<i>AWP 6060TX</i>	150.	195	80	<i>A</i>	18	3.0/25.0
<i>AWP 6060DT</i>	160.	215	120	<i>A</i>	20	20.0
<i>AWP 6061T4</i>	110.	180	120	<i>B</i>	8	25.0
<i>AWP 6061T6</i>	240.	260	80	<i>A</i>	55	20.0
<i>AWP 6063T5</i>	110.	160	70	<i>B</i>	13	3.0/25.0
<i>AWP 6063T6</i>	160.	195	80	<i>A</i>	24	25.0
<i>AWP 6063TX</i>	180.	225	80	<i>A</i>	21	10.0/25.0
<i>AWP 6063DT</i>	190.	220	100	<i>A</i>	31	20.0
<i>AWP 6005T6</i>	200.	250	80	<i>A</i>	20	5.0/10.0/25.0
<i>AWP 6106T6</i>	200.	250	80	<i>A</i>	20	10.0
<i>AWP 6082T4</i>	110.	205	140	<i>B</i>	8	25.0
<i>AWP 6082T5</i>	230.	270	80	<i>B</i>	28	25.0
<i>AWP 6082T6</i>	260.	310	100	<i>A</i>	25	5.0/15.0
<i>AWP 6082ER</i>	240.	295	100	<i>A</i>	17	15.0/40.0
<i>AWP 6082DT</i>	240.	310	100	<i>A</i>	17	5.0/20.0
<i>AWP 7020T6</i>	275.	350	100	<i>A</i>	19	15.0/40.0
<i>AWP 7020DT</i>	280.	350	100	<i>A</i>	19	20.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>BC</i>	<i>np</i>	<i>TMAX</i>
Еврокод:						
<i>AC 42100</i>	147.	203	20.			
<i>AC 42200</i>	168.	224	15.			
<i>AC 43000</i>	63.	126	12.5			
<i>AC 43300</i>	147.	203	20.			
<i>AC 44200</i>	56.	119	30.			
<i>AC 51300</i>	70.	126	20.			

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>TMAX</i>
<i>DIN:</i>						
<i>AL 18</i>	80	180	-	60.0	*	-
<i>AL 20</i>	100	200	-	880	*	-
<i>AL 22</i>	160	215	-	144.5	*	-
<i>AL 25</i>	180	250	-	144.5	*	5.0
<i>AL 27</i>	140	270	-	110.5	*	-
<i>AL 28</i>	210	275	-	168.0	*	
<i>AL 31</i>	230	310	-	229.5	*	20.0
<i>AL 35</i>	290	350	-	246.5	*	30.0

В *ЕС 9* и новом стандарте *DIN 4113 (2002)* используется американская система классификации алюминиевых сплавов. Так как доступно более 300 различных материалов, со значительными различиями в свойствах, пользователь должен тщательно проверить предельные значения толщин элементов и параметры прочности. Для установки значений по умолчанию используется следующая схема:

- Для того чтобы отличить пластинчатые/плитные элементы системы от профильных элементов или труб, используется сплав типа *AWP*. При

использовании термически необработанных сплавов необходимо указать только его идентификационный номер.

- Для моделирования труб и профильных элементов используются сплавы типа *AW*, *ER* или *DT* (*drawn tube*/тянутые трубы). Также важным в процессе ввода сплава в расчетную систему является выбор типа его термообработки (закалки): *T4*, *T5*, *T6* или *TX* для *T66* (см. ГОСТ 22233-2001, *EN 755-2*).
- При необходимости моделирования отлитого из стали элемента программа применяет закалку типа *F* или *T6* по умолчанию.

Так как снижение прочности сплава в зоне термического влияния (*HAZ* – *Heat Affected Zone*) зависит от сварки и толщины элемента, пользователю необходимо задать отдельный материал (*MAT*) для этих зон с явно уменьшенными значениями параметров *FY* и *FT*.

В *DIN 4113* в главе 6.3 приведено требование, чтобы напряжения в элементах из алюминия уменьшались при учете влияния ползучести материала – коэффициент уменьшения напряжений имеет значение 0.8 до 1.0. Поскольку точная оценка влияния ползучести является довольно сложной задачей, в расчете используется общий для всей системы коэффициент запаса 1/с. По умолчанию значение общего для всей системы коэффициента запаса составляет 1.25. Пользователь необходимо вводить более высокие значения коэффициента запаса.

В большинстве случаев учет уменьшения прочности материала при действии высоких температур должен осуществлять пользователем самостоятельно – необходимо ввести соответствующие параметры в расчетную систему, а уменьшение прочности в случае возникновения пожара подчиняется определенной зависимости напряжений и деформаций, возникающих в материале.

По умолчанию для параметров *ES* и *GAM*, учитываемые при расчете абсолютно всех типов сплавов, предустановлены значения 70000 МПа и 28.0 кН/м³, а значения для параметров *FP* и *EPSY* выбираются в соответствии с данными таблицы 10 из нормативного документа *DIN 4113*.

3.14.3 Обычная и преднапряженная арматура

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
Еврокод:								
<i>B 220A</i>	220	340	0	-	-	200000	78.5	
<i>B 220B</i>	220	340	0	-	-	200000	78.5	
<i>B 220C</i>	220	340	0	-	-	200000	78.5	
<i>B 450A</i>	450	472.5	25	-	-	200000	78.5	
<i>B 450B</i>	450	486	50	-	-	200000	78.5	
<i>B 450C</i>	450	517.5	75	-	-	200000	78.5	
<i>B 500A</i>	500	525	25	-	-	200000	78.5	
<i>B 500B</i>	500	540	50	-	-	200000	78.5	
<i>B 500 C</i>	500	575	75	-	-	200000	78.5	
<i>B 550B</i>	550	594	50	-	-	200000	78.5	
<i>B 600B</i>	600	648	50	-	-	200000	78.5	
<i>B 670B</i>	670	800	50	-	-	200000	78.5	
	= SAS 670/800 Металлоконструкции SAH "Stahlwerk Annahütte"							
<i>Y 1100</i>	900	110	3.5			205000	78.5	<i>ECN3</i>
<i>Y 1030</i>	835	1030	3.5			205000	78.5	<i>ECN3</i>
<i>Y 1230</i>	1080	1230	3.5			205000	78.5	<i>ECN3</i>
<i>Y 1450C</i>	110	1450	6.0			130000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1570C</i>	1300	1570	6.0			205000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1670C</i>	1385	1670	6.0			205000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1770C</i>	1470	1770	6.0			205000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1860C</i>	1545	1860	6.0			205000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1770</i>	1520	1770	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1860</i>	1600	1860	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>Y 1960</i>	1685	1960	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 2060</i>	1600	2060	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 2160</i>	1770	2160	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1700</i>	1460	1700	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>
<i>Y 1820</i>	1565	1820	6.0			195000	78.5	<i>ECN2</i>

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>DIN:</i>								
<i>BST 220</i>	220	340	-	-	-.2	210000	78.5	
<i>BST 420</i>	420	500	-	-	-.2	210000	78.5	
<i>BST 500</i>	500	550	-	-	-.2	210000	78.5	
<i>PST 835</i>	835	1030	7	735	-.2	205000	78.5	3.3
<i>PST 1080</i>	1080	1230	6	950	-.2	205000	78.5	3.3
<i>PST 1100</i>	110	1450	6	-	-	130000	78.5	7.5
<i>PST 1375</i>	1375	1570	6	1150	-.2	205000	78.5	7.5
<i>PST 1420</i>	1420	1570	6	1220	-.2	205000	78.5	2.0
<i>PST 1470</i>	1470	1670	6	1250	-.2	205000	78.5	7.5
<i>PST 1570</i>	1570	1770	6	1300	-.2	195000	78.5	7.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>OENORM:</i>								
<i>BSOE 240</i>	240	360	17	-	.4	210000	78.5	
<i>BSOE 420</i>	420	500	10	-	.4	210000	78.5	
<i>BSOE 500</i>	500	550	10	-	.4	210000	78.5	
<i>BSOE 550</i>	550	620	10	-	.4	210000	78.5	

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	-	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>BSOE 600</i>	600	670	10	-	.4	210000	78.5	
<i>BSOE 835</i>	835	1030	7	-	-.2	205000	78.5	3.3
<i>PSOE 1080</i>	1080	1230	6	-	-.2	205000	78.5	3.3
<i>PSOE 1375</i>	1375	1570	6	-	-.2	205000	78.5	7.5
<i>PSOE 1420</i>	1420	1570	6	-	-.2	205000	78.5	2.0
<i>PSOE 1470</i>	1470	1670	6	-	-.2	205000	78.5	7.5
<i>PSOE 1570</i>	1570	1770	6	-	-.2	195000	78.5	7.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>SIA:</i>								
<i>B 500A</i>	500	525	20	-	-	205000	78.5	
<i>B 500B</i>	500	540	45	-	-	205000	78.5	
<i>B 450C</i>	450	520	65	-	-	205000	78.5	
<i>Y 1030</i>	830	1030	20	-	-	205000	78.5	4.0
<i>Y 1100</i>	900	1100	20	-	-	205000	78.5	4.0
<i>Y 1230</i>	1080	1230	20	-	-	205000	78.5	4.0
<i>Y 1570</i>	1300	1570	20	-	-	205000	78.5	4.0
<i>Y 1670</i>	1440	1670	20	-	-	205000	78.5	4.0
<i>Y 1770</i>	1520	1770	20	-	-	195000	78.5	2.5
<i>Y 1860</i>	1600	1860	20	-	-	195000	78.5	2.5

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>BBK-04:</i>								
<i>KS 260</i>	260	-	50	-	-	200000	78.5	≤ 32
<i>KS 500</i>	500	-	50	-	-	200000	78.5	≤ 32
<i>KS 600</i>	600	-	50	-	-	200000	78.5	≤ 32
<i>KSY 1030</i>	835	1030	35	-	-	205000	78.5	4.0
<i>KSY 1670</i>	1470	1670	35	-	-	205000	78.5	4.0
<i>KSY 1770</i>	1500	1770	35	-	-	205000	78.5	4.0
<i>KSY 1860</i>	1650	1860	35	-	-	205000	78.5	4.0
<i>KSY 2060</i>	1790	2060	35	-	-	205000	78.5	4.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>DS-411:</i>								∅
<i>BDS 410</i>	410	-		-	-	200000	78.5	≤ 32
<i>BDS 500</i>	500	-		-	-	200000	78.5	≤ 32
<i>BDS 550</i>	550	-		-	-	200000	78.5	≤ 32

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>NS-3473:</i>								∅
<i>BNS 500</i>	500	-		-	-	200000	78.5	≤ 32

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>DM-96:</i>								
<i>FEB 22</i>	215	335		-	-	200000	78.5	
<i>FEB 32</i>	315	490		-	-	200000	78.5	
<i>FEB 38</i>	375	450		-	-	200000	78.5	

<i>FEB 44</i>	440	540	-	-	205000	78.5	
<i>FEB 39</i>	390	440	-	-	205000	78.5	
<i>DM-2008,</i> <i>DM-2018</i>							
<i>FEB 450A</i>	450	540	22.5	-	205000	78.5	
<i>FEB 450C</i>	450	540	67.5	-	205000	78.5	

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>MSZ:</i>								
<i>B 240B</i>	240	380		210	-	200000	78.5	
<i>B 360B</i>	360	500		310	-	200000	78.5	
<i>B 500B</i>	500	600		420	-	200000	78.5	
<i>Y 1030</i>	830	1030		720	-	195000	78.5	
<i>Y 1230</i>	1080	1230		920	-	195000	78.5	
<i>Y 1670</i>	1435	1670		1230		195000	78.5	
<i>Y 1770</i>	1520	1770		1320	-	195000	78.5	
<i>Y 1860</i>	1580	1860		1375	-	195000	78.5	

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>EHE:</i>								
<i>B 400</i>	400	440	50	-	-	200000	78.5	
<i>B 500</i>	500	550	50	-	-	200000	78.5	
<i>Y 1570</i>	1340	1570	35	-	-	205000	78.5	
<i>Y 1670</i>	1420	1670	35	-	-	205000	78.5	2.0
<i>Y 1770</i>	1500	1770	35	-	-	205000	78.5	2.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>Y 1860</i>	1580	1860	35	-	-	205000	78.5	2.0
<i>Y 1960</i>	1670	1960	35	-	-	195000	78.5	2.0
<i>Y 2060</i>	1750	2060	35	-	-	195000	78.5	2.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>British</i>								
<i>Standart:</i>								
<i>SBS 250</i>	250	250		-	-	200000	78.5	
<i>SBS 460</i>	460	460		-	-	200000	78.5	
<i>SBS 500</i>	500	500		-	-	200000	78.5	
<i>PSBS 1570</i>	1256	1570	-5	-	-	205000	78.5	8.0
<i>PSBS 1620</i>	1296	1620	-5	-	-	205000	78.5	8.0
<i>PSBS 1670</i>	1336	1670	-5	-	-	205000	78.5	8.0
<i>PSBS 1720</i>	1376	1720	-5	-	-	205000	78.5	8.0
<i>PSBS 1770</i>	1416	1770	-5	-	-	205000	78.5	8.0
<i>PSBS 1860</i>	1488	1860	-5	-	-	205000	78.5	8.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>South Africa</i>								
<i>TMH7:</i>								
<i>SABS 250A</i>	250	250		-	-	200000	78.5	
<i>SABS 450A</i>	450	450		-	-	200000	78.5	
<i>SABS 500A</i>	500	500		-	-	200000	78.5	

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>ACI/AASHTO:</i>								
<i>SACI 40</i>	280	420		-	-	200000	78.5	
<i>SACI 50</i>	350	560		-	-	200000	78.5	
<i>SACI 60</i>	420	620		-	-	200000	78.5	
<i>SACI 65</i>	460	460		-	-	200000	78.5	
<i>SACI 70</i>	490	560		-	-	200000	78.5	
<i>SACI 75</i>	520	690		-	-	200000	78.5	
<i>SACI 80</i>	550	725		-	-	200000	78.5	
<i>PSAC 160</i>	1100	1250		-	-	207000	78.5	2.0
<i>PSAC 250</i>	1730	1730		-	-	197000	78.5	8.0
<i>PSAC 270</i>	1860	1860		-	-	197000	78.5	8.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>NBR:</i>								
<i>CP 25</i>	250	300		-	-	210000	78.5	
<i>CP 40</i>	400	440		-	-	210000	78.5	
<i>CP 50</i>	500	550		-	-	210000	78.5	
<i>CP 60</i>	600	660		-	-	210000	78.5	
<i>CA 85</i>	850	1050		-	-	200000	78.5	
<i>CA 150RN</i>	1280	1500	6.0	-	-2	195000	78.5	
<i>CA 150RB</i>	1350	1500	6.0	-	-2	195000	78.5	7.5
<i>CA 160RN</i>	1360	1600	5.0	-	-2	195000	78.5	3.0
<i>CA 160RB</i>	1440	1600	5.0	-	-2	195000	78.5	5.0
<i>CA 170RN</i>	1490	1700	5.0	-	-2	195000	78.5	2.0
<i>CA 170RB</i>	1580	1700	5.0	-	-2	195000	78.5	5.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>CA 175RN</i>	1490	1755	3.5	-	-2	185000	78.5	2.0
<i>CA 175RB</i>	1580	1755	3.5	-	-2	185000	78.5	7.0
<i>CA 180RN</i>	1530	1800	3.5	-	-2	185000	78.5	2.5
<i>CA 190RN</i>	1610	1900	3.5	-	-2	185000	78.5	7.0
<i>CA 190RB</i>	1710	1900	3.5	-	-2	185000	78.5	7.0

	<i>FY</i>	<i>FT'</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>GB:</i>								
<i>SGB 235</i>	210		235	-	-	210000	78.5	
<i>SGB 335</i>	300		335	-	-	200000	78.5	
<i>SGB 400</i>	360		400	-	-	200000	78.5	
<i>PSGB 1470</i>	1040	400	1470	-	-	210000	78.5	5.0
<i>PSGB 1570</i>	1110	410	1570	-	-	205000	78.5	5.0
<i>PSGB 1670</i>	1180	410	1670	-	-	205000	78.5	5.0
<i>PSGB 1770</i>	1250	410	1770	-	-	205000	78.5	5.0
<i>PSGB 1570S</i>	1110	390	1570	-	-	195000	78.5	5.0
<i>PSGB 1720S</i>	1220	390	1720	-	-	195000	78.5	5.0
<i>PSGB 1860S</i>	1320	390	1860	-	-	195000	78.5	5.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>GBJ:</i>								
<i>SGB I</i>	235	235		-	-	210000	78.5	8.0
<i>SGB II</i>	335	335		-	-	210000	78.5	2.5
<i>SGB IV</i>	380	835		-	-	190000	78.5	5.0
<i>PSGB IV</i>	751	835		-	-	190000	78.5	5.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>RELI</i>
<i>AS/NZS:</i>								
<i>SAS 250</i>	250	250		-	-	200000	78.5	
<i>SAS 400</i>	400	400		-	-	200000	78.5	
<i>SAS 450</i>	450	450		-	-	200000	78.5	
<i>SAS 500</i>	500	500		-	-	200000	78.5	
<i>PAS 1030</i>	840	1030		-	-	200000	78.5	3.0
<i>PAS 1670</i>	1340	1670		-	-	205000	78.5	1.0
<i>PAS 1700</i>	1360	1700		-	-	205000	78.5	1.0
<i>PAS 1790</i>	1468	1790		-	-	195000	78.5	2.0
<i>PAS 1830</i>	1500	1830		-	-	195000	78.5	2.0
<i>PAS 1870</i>	1533	1870		-	-	195000	78.5	2.0

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>EPST</i>	<i>FP</i>	<i>EPSY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	<i>TMAX</i>
<i>ET RC-2001:</i>								
<i>SET 350</i>	350	240		350		200000	78.5	40.
<i>SET 450</i>	45	280		450		200000	78.5	40.
<i>SET 520</i>	520	360		520		200000	78.5	36.
<i>SET 520M</i>	520	450		520		200000	78.5	-
<i>SET 600</i>	600	400		600		200000	78.5	36.

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>FPY</i>	<i>ES</i>	<i>GAM</i>	γ_s	
<i>CII 52-101-2003:</i>								
<i>SNIA 240</i>	235	400	190	235	-	200000	78.5	1.10

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>FYC</i>		<i>ES</i>	<i>GAM</i>	γ_s
<i>SNIA 300</i>	300	500	235	300	-	200000	78.5	1.10
<i>SNIA 400</i>	400	500	320	400	-	200000	78.5	1.13
<i>SNIA 500</i>	500	60	345	460	-	200000	78.5	1.15
<i>SNIA 500</i>	410	500	290	360	-	200000	78.5	1.20

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>FYC</i>		<i>ES</i>	<i>GAM</i>	γ_s
<i>RK 5.03-33-2005:</i>								
<i>SNIA 600</i>	600	800	360	540	-	200000	78.5	1.15
<i>SNIA 800</i>	800	1000	360	575	-	200000	78.5	1.15
<i>SNIA 1000</i>	1000	1000	360	600	-	200000	78.5	1.20

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>FYC</i>		<i>ES</i>	<i>GAM</i>	γ_s
<i>СНП</i>								
<i>2.03.01:</i>								
<i>SNIA I</i>	225	235	175	225	-	210000	78.5	1.05
<i>SNIA II</i>	280	295	225	280	-	210000	78.5	1.05
<i>SNIA III</i>	365	390	290	365	-	200000	78.5	1.10
<i>SNIA IV</i>	510	590	405	450	-	190000	78.5	1.15
<i>SNIA V</i>	680	788	545	500	-	190000	78.5	1.15
<i>SNIA VI</i>	815	980	650	500	-	190000	78.5	1.20
<i>SNIA VII</i>	980	1175	785	500	-	190000	78.5	1.20
<i>SNIB I</i>	410	1000	290	375	-	170000	78.5	1.20
<i>SNIB 1000</i>	850	1000	680	500	-	200000	78.5	1.20
<i>SNIB 1100</i>	915	1100	730	500	-	200000	78.5	1.20
<i>SNIB 1200</i>	1000	1200	785	500	-	200000	78.5	1.20

	<i>FY</i>	<i>FT</i>	<i>FP</i>	<i>FYC</i>		<i>ES</i>	<i>GAM</i>	γ_s
<i>SNIB 1300</i>	1050	1300	835	500	-	200000	78.5	1.20
<i>SNIB 1400</i>	1170	1400	940	500	-	200000	78.5	1.20
<i>SNIB 1500</i>	1250	1500	1000	500	-	200000	78.5	1.20

К стальной арматуре типа *B* в расчетной системе можно добавить дополнительный классифицирующий параметр, характеризующий пластичность:

- A* Арматурные стержни со стандартной пластичностью (холоднодеформированная)
- B* Арматурные стержни с высокой пластичностью (теплодеформированная)
- C* Арматурные стержни с очень высокой пластичностью (теплодеформированная)

При использовании стальной немецкой арматуры типа *BST* для моделирования арматурной сетки имеется возможность производить соответствующие расчеты, как по новому стандарту *DIN 1045-1* (параметры *SA/SB*), так и по старому стандарту *DIN 1045* (параметры *MA/MB*).

Для большинства обычных и предварительно напряженных арматурных стержней значение коэффициента запаса *SCM* равняется 1.15 и 1.05 (*BS*) соответственно. Коэффициент запаса в обязательном порядке необходим при расчете полных значений пластических внутренних усилий, возникающих в металлических и композитных сечениях при нагружении.

В процессе нелинейного анализа с постоянным коэффициентом запаса в соответствии с нормативным документом *DIN 1045-1* прочность бетона будет уменьшена, в то время как прочность арматуры будет увеличена. Для последующего удобства в расчетах генерируется специальная функция зависимости напряжений и деформаций с учетом коэффициента запаса, равным 1.3.

В российских нормативных документах СНиП для элементов, обеспечивающих поперечные связи, а также наклонных элементов значение прочности уменьшено. Это значение характеризуется параметром FP . В самом общем случае может потребоваться использование отдельного материала с пониженным значением прочности.

ПРИМЕЧАНИЕ: Некоторые параметры материала могут зависеть от других параметров, не известных программе. Например, диапазон динамических напряжений, возникающих в арматуре, зависит не только от диаметра арматурных стержней $TMAX$, но также от кривизны и типа материала из которого выполнен арматурный канал (сталь, пластик). Во всех этих случаях необходимо использовать разные материалы (номер материала) и самостоятельно указывать изменения значений различных параметров.

3.14.4 Процесс релаксации

Процесс релаксации арматурных пучков моделируется в программе при помощи модуля $AQUA/AQB$. Несмотря на то, что временной фактор релаксации уже задан в модуле AQB , в модуле $AQUA$ данный фактор, зависящий от напряжения, вводится в расчетную систему в размере 1000 часов – момент начала релаксации арматурных пучков. Процесс релаксации арматурных пучков может быть смоделирован в расчетной системе при помощи коэффициентов релаксации $REL1$ и $REL2$ (см. п.п. 3.14), характеризуемых линейными соотношениями $0.55 \cdot f_{pk}$ и $0.70 \cdot f_{pk}$ соответственно. Также процесс релаксации может быть введен в расчетную систему с помощью специальных параметров команды $REL2$, характеризуемых квадратичными функциями в соответствии с $CEB/EN1992$ или функциями общего вида в соответствии с $BPEL$ *annexe 2* (приложение 2; Франция) или $AS 3600$ (Австралия).

Команда/ параметр	$0.60 \cdot f_{pk}$	$0.70 \cdot f_{pk}$	$0.80 \cdot f_{pk}$	
<i>CEB1</i> <i>CEB2</i> <i>CEB3</i>	4.00% 1.00% 2.00%	8.00% 2.00% 4.00%	12.00% 5.00% 6.67%	<u>Типовая модель CEB 1990</u> нормальная упрочненная стержневая арматура
<i>ECL1</i> <i>ECL2</i> <i>ECL3</i>	4.50% 1.00% 1.50%	8.00% 2.50% 4.00%	12.00% 4.50% 7.00%	<u>Евростандарты EN 1992 (2004)</u> средние ($\rho_{1000} = 8.0$) низкая релаксация ($\rho_{1000} = 2.5$) стержневая арматура ($\rho_{1000} = 4.0$)
<i>RN</i> <i>TBR</i>	При-ие 2	8.00% 2.50%	При-ие 2	<u>BPEL 91</u> нормальная релаксация очень низкая релаксация
<i>AS</i>	0.00% 0.00% 0.00% при $0.40 \cdot f_{pk}$	1.00% 2.00% 3.00%		<u>AS 3600/5100</u> R_b (глава 6.3.4)
<i>IRC</i> <i>IRCL</i>	0.00% 0.00% при $0.50 \cdot f_{pk}$	5.00% 2.50%		<u>IRC 112</u>

В немецких нормах используются общие технические допуски по конструкции. Типовые значения допусков предусмотрены в программе по умолчанию, но при необходимости могут быть изменены пользователем собственноручно при помощи параметра *MEXT*.

3.14.5 Сцепление арматуры с бетоном

Требования, предъявляемые к сцеплению арматуры с бетоном, в различных государственных стандартах в значительной степени отличаются друг от друга. Сцепление арматуры с бетоном определяется характеристиками арматурной стали (состояние ее поверхности, профиль, диаметр и механические свойства) и бетона (прочность, деформативность, возраст, состав, свойства цемента и заполнителей и т.д.). При вводе в расчетную систему бетона указывается максимальное значение напряжения сцепления с арматурой для выполнения соответствующих требований, зависящих от выбранных норм проектирования. Значения параметров R , характеризующих относительную прочность сцепления арматуры с бетоном, представлены в соответствующих таблицах нормативных документов:

Tab. 6.2 EN 1992-1-1 ($R = 0.3 \div 0.8$)

Tab. 15 DIN 1045-1 ($R = 0.3 \div 0.8$)

Tab. 7 DIN 4227 A1 ($R = 0.3 \div 0.9$)

Tab. 9.3.1 GB 50010 ($R = \alpha/0.14 = 0.737 \div 1.077$)

При необходимости использования различных характеристик сцепления в расчетной системе должны быть введены различные материалы. В данном случае используются следующие характеристики сцепления:

- Максимальное армирование
- Ширина раскрытия трещины
- Усталостная прочность
- Ограничение роста напряжений в арматурных пучках

Относительные свойства сцепления в основном используются в государственных стандартах для учета уменьшенных значений свойств арматурных пучков. Также данные свойства используются для учета различных диаметров арматуры и свойств пассивного армирования. Для учета ширин

раскрытия трещин используется их среднее значение, а для учета диаметров арматуры и свойств сцепления используются их среднеквадратичные значения.

Просим ознакомиться с примечанием для параметра FBD команды $CONC$.

Второй коэффициент используется в тех государственных стандартах, в которых используются специальные значения, которые явно не вычитаются из одиночного относительного коэффициента сцепления арматуры с бетоном. Это характерно для исходной версии Еврокода и российского СНиПа:

Табл. 4.14 СНиП 2.03.01 ($KI = \eta = 1.0 \div 1.4$)

Табл. 7.2.12 СП 52-101 ($KI = \varphi_2 = 0.5 \div 0.8$)

Значения параметров R и KI , используемые программой по умолчанию, приведены таблице ниже. Однако имеются некоторые отклонения, значения которых зависят от выбранного государственного стандарта проектирования и значения прочности:

	R	KI
Обычная арматура	1.00	0.80
Преднапряженная арматура	0.75	1.60

3.14.16 Зависимость напряжений и деформаций

Процесс развития деформаций от действия соответствующих напряжений может включать до четырех этапов:

- До предела упругости материала ($FP/ES, FP$)
- Предела текучести ($EPSY, FY$) $EPSY$ может быть задан как абсолютный (положительный) или относительный (отрицательный) предел текучести при растяжении
- До предела прочности на растяжение ($EPST, FT$)

- Постоянное значение прочности, приближенное к бесконечности (1000 о/оо)

В зависимости от типа стали и класса бетона будут установлены значения параметров $EPSY$ и $EPST$, а также FP . Путем явного ввода значений данных параметров пользователь можете исключить влияние других параметров:

- Если значение FP не меньше значения FY , то первая часть будет исключена из расчетной системы.
- Если значение $EPST$ не больше значения $EPSY$, то третья часть будет исключена из расчетной системы.

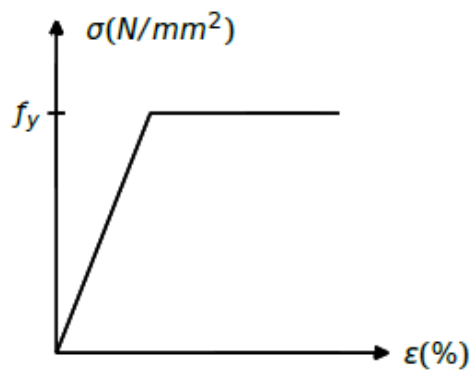
Более общие зависимости напряжений и деформаций, возникающих в элементе, определяются с помощью команды $SSLA$.

В большинстве случаев зависимости напряжений и деформаций, возникающих в элементах системы, характеризуют эксплуатационные и предельные состояния сооружения (расчет конструкции по предельным состояниям). Однако в характеристиках напряженно-деформированных состояний арматурных стержней в соответствии с $EC2$ и $DIN 1045-1$ имеются многочисленные изменения.

Поскольку принцип использования коэффициента запаса прочности не подразумевает генерирование аффинной кривой предельного состояния, коэффициент запаса будет включен в расчет системы незамедлительно.

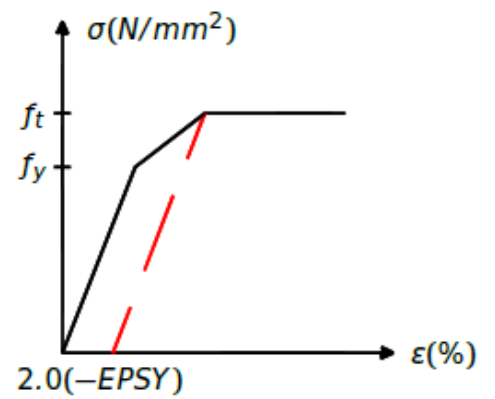
Несмотря на то, что предел прочности на растяжение арматурной стали со стандартной пластичностью будет достигнут при 25 о/оо, использование данной прочностной характеристик не допускается при проектировании сооружения по нормам $DIN 1045-1$. Учитывая данный факт, кривые зависимости напряжений и деформаций при проектировании/расчете и нелинейном анализе сооружения отличны друг от друга для рассматриваемых материалов.

Стандартная двухлинейная диаграмма



S (Eurocode 2)

Стандартная трехлинейная диаграмма



PS (Eurocode 2)

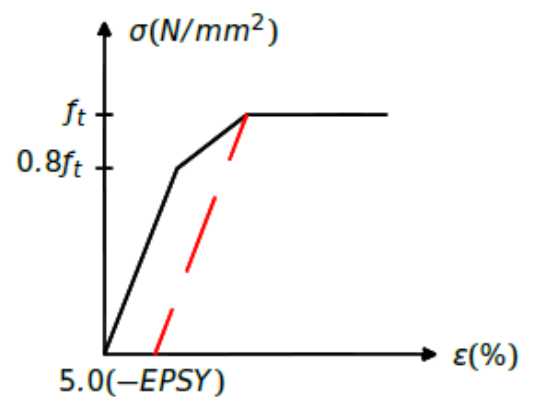
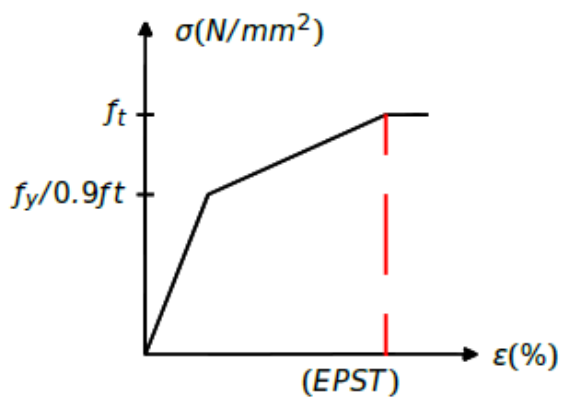


Рис. 3.24 – Кривые зависимостей напряжений и деформаций

3.15 TIMB – Древесные и волокнистые материалы

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала (1-999)	-	1
<i>TYPE</i>	Тип материала см. ниже	<i>LIT</i>	*
<i>CLAS</i>	Класс древесины/тип матрицы жесткости составных волокон	-	*
<i>EP</i>	Продольный модуль упругости (вдоль волокна)	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>G</i>	Модуль упругости при сдвиге	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>E90</i>	Поперечный модуль упругости (перпендикулярно волокну)	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*
<i>QH</i>	Коэффициент Пуассона ν_z (древесно-полимерные композитные панели)	-	*
<i>QH90</i>	Коэффициент Пуассона ν_{xy} (деревянный массив)	-	*
<i>GAM</i>	Удельный/объемный вес	[кН/м ³] ₁₀₉₁	*
<i>ALFA</i>	Температурный коэффициент продольного расширения/удлинения	[1/К] ₁₀₈₃	0.0
<i>SCM</i>	Коэффициент запаса по материалу	-	1.3/*
<i>FM</i>	Предел прочности на изгиб	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FT0</i>	Прочность на растяжение вдоль волокон	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FT90</i>	Прочность на растяжение поперек волокон	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FC0</i>	Прочность на сжатие вдоль волокон	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FC90</i>	Прочность на сжатие поперек волокон	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FV</i>	Предел прочности при действии сдвига в центре элемента (сдвигающее усилие)	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
			*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>FVR</i>	Предел прочности при действии сдвига с края элемента (кручение)	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FVB</i>	Предел прочности на сдвиг при изгибании плиты/пластины	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FM90</i>	Прочность при изгибе поперек волокон	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>G90</i>	Модуль упругости при сдвиге в процессе изгиба плиты/пластины	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	0.0
<i>OAL</i>	Меридианный угол анизотропного материала	град.	0.0
<i>OAF</i>	Угол падения анизотропного материала	град.	
<i>KMOD</i>	Изменение прочности при действии постоянной нагрузки	-	*
<i>KMO1</i>	-//- долгосрочной нагрузки	-	*
<i>KMO2</i>	-//- среднесрочной нагрузки	-	*
<i>KMO3</i>	-//- кратковременной нагрузки	-	*
<i>KMO4</i>	-//- максимально кратковременной	-	*
<i>KDEF</i>	нагрузки	-	*
<i>TMAX</i>	Изменение прочности при замедленном прогибе	[мм] ₁₀₂₅	*
<i>RHO</i>	Максимальная толщина плиты/пластины Плотность	[кг/м ³] ₁₁₈₉	*
<i>TITL</i>	Название материала	<i>Lit32</i>	*

Команда *TIMB* позволяет задать материал с необходимой для расчетной системы ориентацией волокон. Для облегчения работы пользователя в программе используется классификация древесины по Еврокоду, которая заимствована из нормативной документации *DIN*, *OENORM* и *SIA*, а также в программе используется немецкая классификация древесных материалов. Поскольку в

стандарте *EN 1995* не указаны значения прочностных параметров, то при использовании других государственных стандартов они – значения прочностных параметров, должны быть введены в расчетную систему пользователем собственноручно.

В соответствии с *EN 1995 (EC5)* и другими производными нормами проектирования для корректировки значений допустимых напряжений в расчетной системе используется коэффициент k_{mod} , а для корректировки деформаций используется коэффициент k_{def} . Различные значения характеристик зависят не только от рассматриваемого материала, но также от степени ухода за ним и от продолжительности действия нагрузки. В следующей таблице приведены значения характеристик массива древесины, однако в программе используется гораздо больше характеристик, и пользователь имеет возможность собственноручно ввести необходимое значение для каждой из них.

Классификация по продолжительности действия нагрузки	Степень ухода за материалом		
	1	2	3
Постоянная/неизменная	0.60	0.60	0.50
Долговременная	0.70	0.70	0.55
Среднедействующая	0.80	0.80	0.65
Кратковременная	0.90	0.90	0.70
Максимально кратковременная	1.10	1.10	0.90
k_{def}	0.60	0.80	2.00

Степень ухода может быть указана либо при определении норм проектирования/государственного стандарта – параметр *NORM*, либо введена в расчетную систему напрямую на языке *CADINP* – класс древесины → двоеточие (:) → степень ухода за материалом. Например, ввод *TIMB C 30: 2* характеризует массив мягкой древесины класса прочности 30 со степенью ухода 2.

Исходные значения прочности приведены в нормативном документе *EN 338*, согласованном с *EN 1194*. Необходимо помнить, что значение предела

прочности на сдвиг FV должно быть уменьшено ввиду учета образовавшихся трещин – $k_{cr} \cdot f_v$. В Германии данный коэффициент был выбран для обеспечения одинаковой прочности на сдвиг для всех классов древесины.

Тип древесины	Степень ухода	Ссылка на документ
<i>C</i>	14 / 16 / 18 / 20 /	EN 1995, DIN 1052-2004: Древесина мягких пород, массив Табл. F5
	22 / 24 / 27 / 30	
<i>D</i>	35 / 40 / 45 / 50	Древесина твердых пород, массив Табл. F7
	30 / 35 / 40 / 50 /	
<i>GL</i>	60 / 70	Однородная ламинированная древесина Табл. F9
	24 / 28 / 32 / 36	
<i>PLY</i>	24C / 28C / 32C / 36C	Многослойная фанера, Табл. F11/F12
	25 / 40 / 50 / 60	
<i>PART</i>	1 / 4 / 5 / 6 / 7	ДСП – древесно-стружечная плита, Табл. F15/F16/F17/F18
	2 / 3 / 4	
<i>OSB</i>		<i>OSB</i> – плиты из крупноразмерной ориентированной стружки Табл. F13/F14
<i>FIB</i>	<i>HB</i>	Твердая древесноволокнистая плита Полутвёрдая древесноволокнистая плита Древесноволокнистая плита средней плотности Мягкая древесноволокнистая плита
	<i>MHB</i>	
	<i>MDF</i>	
	<i>SB</i>	
<i>C</i>	20 / 24 / 27 / 35 / 45	SIA 265: Древесина мягких пород, массив, Таб. 6 Древесина твердых пород, массив (Бук / Дуб) Однородная ламинированная древесина, Табл. 7
	30	
	24H / 28H / 36H	

Тип древесины	Степень ухода	Ссылка на документ
	24К / 28К / 36К	Комбинированная ламинированная древесина, Табл. 7

Тип древесины	Степень ухода	Ссылка на документ
<i>S</i>	7 / 10 / 13	DIN 1052 A-1: Дерево, класс. в соот.. <i>DIN 4076</i>
<i>MS</i>	10 / 13 / 17	Дерево, класс. в соот.. <i>DIN 4076</i>
<i>BS</i>	11 / 14 / 16 / 18	Клееный брус DIN 1052 (старый):
<i>NA</i>	1 / 2 / 3	Древесина мягких пород
<i>BS</i>	1 / 2	Клееный брус
<i>LA/LB/LC</i>		Древесина твердых пород
<i>FTK/L/BE</i>		ÖNORM B3001: Ель, пихта, сосна / лиственница, бук, дуб
<i>GFK/CFK/SFK</i>	Значения	Материалы из стекольного/углеродного/
<i>SFK</i>	характеристик	синтетического волокна
	сильно зависят от	
	свойств волокна	
<i>EP</i>	40000 / 5000 12.5	Эпоксидная смола
<i>UP</i>	30000 / 4500 12.5	Ненасыщенная полиэфирная смола
<i>VE</i>	20000 / 3500 10.7	Винилэфирная смола

В деревянных конструкциях используется много композитных материалов. Точный анализ подобных конструкций возможен только при использовании композитных/составных сечений или параметра *MLAY*, однако для облегчения создания расчетной системы в нормах проектирования представлены эквивалентные материалы с однородной структурой. Поскольку прочность элемента не сильно, но все же зависит от его толщины, то данная характеристик должна быть задана пользователем в обязательном порядке – параметр *TMAX*.

Древесина, как материал, в силу своей структуры обладает разными свойствами в разных направлениях; образец вырезанный вдоль волокна покажет при испытании на растяжение и сжатие совершенно иные свойства, чем образец, вырезанный в поперечном направлении. Такие материалы, которые обладают разными свойствами в разных направлениях, называются анизотропными – древесина является ортотропным материалом, как частный случай анизотропии. Свойства материала, введенные в систему при помощи команды *TIMB*, формально эквивалентны, но не идентичны свойствам, введенным в систему при помощи команды *MATE*. Если ось x была выбрана в качестве направления действия особых свойств материала, то данный материал будет идентичен вводу через *TIMB*:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu_{90} \cdot \frac{(\sigma_y + \sigma_z)}{E_{90}} \quad (3.120)$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_{90}} - \mu \cdot \frac{\sigma_z}{E_{90}} - \mu_{90}^* \cdot \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.121)$$

$$\epsilon_z = \frac{\sigma_z}{E_{90}} - \mu \cdot \frac{\sigma_y}{E_{90}} - \mu_{90}^* \cdot \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.122)$$

$$\mu_{90}^* = \mu_{90} \cdot \frac{E}{E_{90}} \quad (3.123)$$

Обратите внимание, что коэффициенты Пуассона μ_{90} и μ_{90}^* больше не ограничены значением 0.5, а зависят от соотношения модулей упругости, так как результирующая матрица напряжений-деформаций элемента должна быть симметричной.

Порядок индексов характеризующих компоненты напряжений и деформаций устанавливаются следующим образом:

[x y z xy xz yz]	общий случай объемного НДС		
[x y xy z]	плоское	деформированное	состояние,
	осевая симметрия		
[x y xy]	плоское напряженное состояние		

В случае осевой симметрии элемента ось x характеризует ось вращения, а ось y и z характеризуют радиальное и тангенциальное направления соответственно.

Кроме того, необходимо учитывать следующие условия:

$$E_1 = E_{90}, E_2 = E, \mu_1 = \mu_{90}, \mu_2 = \mu, G_1 = G_{90}, G_2 = G \quad (3.124)$$

Общий случай объемного НДС:

Трехмерная матрица жесткости материала получается путем инверсии матрицы деформаций-напряжений и соответствующих преобразований (ось z – нормаль к изотропной плоскости = направление волокна):

$$D = \begin{vmatrix} E_1 \cdot \frac{1-n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_1+n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_1+n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{1-n \cdot \mu_2^2}{(1+\mu_1) \cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 & 0 & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & E_2 \cdot \frac{1-\mu_1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2 \end{vmatrix} \quad (3.125)$$

$$n = \frac{E_1}{E_2}, m = 1 - \mu_1 - 2 \cdot n \cdot \mu_2^2 \quad (3.126)$$

Плоско-деформированное состояние: ось x соответствует направлению волокна (= нормаль к изотропной плоскости). Уменьшенная матрица напряжений-деформаций имеет следующий вид:

$$D = \begin{vmatrix} E_2 \cdot \frac{1-\mu_1}{m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & E_1 \cdot \frac{1-n\cdot\mu_2^2}{(1+\mu_1)\cdot m} & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \\ E_1 \cdot \frac{\mu_1+n\cdot\mu_2^2}{(1+\mu_1)\cdot m} & E_1 \cdot \frac{\mu_2}{m} & 0 \end{vmatrix} \quad (3.127)$$

$$n = \frac{E_1}{E_2}, \quad m = 1 - \mu_1 - 2 \cdot n \cdot \mu_2^2 \quad (3.128)$$

Плоское напряженное состояние: ось x соответствует направлению волокна (= нормаль к изотропной плоскости). Матрица жесткости материала получается путем инверсии уменьшенной матрицы деформаций-напряжений и соответствующих преобразований:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{E_2}{1-n\cdot\mu_2^2} & \frac{E_1\cdot\mu_2}{1-n\cdot\mu_2^2} & 0 \\ \frac{E_1\cdot\mu_2}{1-n\cdot\mu_2^2} & \frac{E_1}{1-n\cdot\mu_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \end{vmatrix}, \quad n = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.129)$$

Осевая симметрия:

Общий случай анизотропии не нуждается в рассмотрении, так как осевая симметрия свойств материала была бы невозможна при таких обстоятельствах. На практике особый интерес представляет направление волокон материала, параллельное оси вращения x (= ось x , перпендикулярная к изотропной плоскости материала). В таком случае матрица жесткости материала имеет следующий вид:

$$D = A \cdot \begin{vmatrix} \frac{1-\mu_1^2}{n} & \mu_2(1+\mu_1) & 0 & \mu_2(1+\mu_1) \\ \mu_2(1+\mu_1) & (1-n\mu_2^2) & 0 & \mu_1+n\mu_2^2 \\ 0 & 0 & \frac{G_{90}}{A} & 0 \\ \mu_2(1+\mu_1) & \mu_1+n\mu_2^2 & 0 & 1-n\mu_2^2 \end{vmatrix} \quad (3.130)$$

$$A = \frac{E_2 \cdot n}{(1+\mu_1) \cdot m}, \quad n = \frac{E_1}{E_2}, \quad m = 1 - \mu_1 - 2 \cdot n \cdot \mu_2^2 \quad (3.131)$$

Определение направления волокна:

В зависимости от типа элемента в программе имеется несколько иная направленность ортотропного материала:

Для балочных элементов направление волокна совпадает с направлением оси балки.

Для плоских систем (*TALPA*) параметр *OAF* характеризует угол между направлением волокна и осью *x* элемента. Значения параметров E_{90} и μ_{90} в дальнейшем определяются для изотропной плоскости, нормаль (перпендикуляр) к которой определяется (наклон) направлением волокна.

Для оболочек и пластин возможно задание волокон (например, фанера или многослойная фанера) в обоих направлениях – *x* и *y*. Таким образом, ввод анизотропного материала в расчетной системе сводится к заданию различных значений модулей сдвига для каждого отдельного слоя мембранного элемента ($G_m = 0.5E_{90}/(1+\mu)$) и направления действия поперечного сдвигающего усилия (*G*). Ввод рассматриваемого материала может быть выполнен либо при помощи собственноручного задания параметра $E_{90} == E$, либо в виде многослойного материала – команда *MLAY*. Для моделирования вертикально расположенных деревянных элементов (досок), связанных между собой, пользователь может использовать коэффициенты ортотропии, характеризующие толщины элементов (\rightarrow *QUIAD* элементы) или использовать объемное *3D* моделирование расчетной схемы.

В трехмерных системах (сплошные/монолитные элементы) волокна материала направлены вдоль оси *z* по умолчанию. Другие направления волокон могут быть заданы путем определения положения изотропной плоскости в трехмерном пространстве (= плоскость, направление нормали которой совпадает с направлением волокна) за счет значения меридианного угла и угла падения, полученные в результате геологических изысканий (подобие команды *MATE*).

3.16 MASO – Каменная/кирпичная кладка

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала (1-999)	-	1
<i>STYP</i>	Тип материала для кирпича: <i>CL</i> Необожжённый/строительный кирпич <i>CS</i> Силикат кальция/известковый песок <i>LC</i> Легкий бетон <i>C</i> Бетонный кирпич <i>AC</i> Газобетон <i>MS</i> Искусственный камень <i>NS</i> Природный камень	<i>LIT</i>	<i>CL</i>
<i>SCLA</i>	Прочность кирпича	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>MCLA</i>	Группа или прочность раствора/клея <i>I, II, III, IIIa</i> Стандартный раствор <i>DM</i> Тонкий слой раствора <i>LM21, LM36</i> Облегченный раствор <i>numerical</i> Качественный раствор	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	
<i>FK</i>	Прочность на сжатие f_k	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FB</i>	Прочность кирпича на сжатие f_b	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FM</i>	Прочность раствора/клея f_m	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FVK0</i>	Адгезионная прочность на сдвиг $f_{vk, 0}$	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FV</i>	Максимальная прочность на сдвиг	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FT</i>	Предел прочности на растяжение	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>FTB</i>	Предел прочности кирпича на растяжение	[Н/мм ²] ₁₀₉₂	*
<i>SCM</i>	Коэффициент запаса прочности материала	-	*
<i>E</i>	Модуль упругости	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>G</i>	Модуль упругости при сдвиге	[Н/мм ²] ₁₀₉₀	0.4 <i>E</i>
<i>MUE</i>	Коэффициент Пуассона	-	0.25
<i>GAM</i>	Объемный вес	[кН/м ³] ₁₀₉₁	*
<i>ALFA</i>	Коэффициент температурного расширения	[1/К] ₁₀₈₃	*
<i>TITL</i>	Название материала	<i>Lit32</i>	*

Приведенные в таблице расчетные параметры взяты из *EN 1996-1-1*. В приложении нормативного документа должно быть указано, получены ли значения данных параметров в результате экспериментальных (I) или в результате расчетно-теоретических исследований (II), приведенных в таблице 3.3 и посчитанные с использованием формул 3.1-3.2. В обоих случаях необходимо определиться с номером группы, значение которой (от 1 до 4) зависит от количества отверстий в кирпиче. Количество отверстий в кирпиче (параметр *STYP*) в расчетной системе вводится следующим образом: *CL: 3*.

Во всех случаях, когда в нормативной документации в обязательном порядке предусмотрено уменьшение значения параметра *K*, в программе это может быть учтено при задании параметра *FK = 80[%]*.

Модуль *AQUA* поддерживает немецкие государственные стандарты по производству кирпича. В таблице *NA.4* кирпичу марки *HLzA/B* и т. п. соответствует 2-ая группа, в таблице *NA.5* кирпичу марки *HLzW* и т.п. соответствует 3-я группа. В таблице *NA.9* для полнотелых кирпичей марок *Vn*, *Vbn*, *Vm* и *Vmb* устанавливается 1-я группа, для полнотелых кирпичей марок *Vbl S* и *Vbl SW* устанавливается 2-я группа, для полнотелых кирпичей марок *V* и *Vbl* с устанавливается 3-я группа, а для пустотелого (дырчатого) кирпича марок *Hbl S* и *Hbn* устанавливается 4-я группа.

Для кирпичной кладки, в соответствии с британскими нормами *BS 5628-1/2*, обозначения «*BS-1*» и «*BS-2*» с соответствующим индексом группы от *A* до *D* добавляются в расчетную систему после двоеточия, что необходимо для

определения типа материала кирпича (*СТУР*). Для условного обозначения типа строительного раствора используются римские цифры от I до IV. Параметр *FT* характеризует предел прочности на изгиб в соответствии с таблицей 3 – «изгиб параллельный горизонтальному шву кладки» (рисунок 3.25а). Параметр *FV* характеризует вертикальную прочность кладки при действии сдвига в соответствии с рисунком 2 и параграфом 25 из *BS 5628-2*. Согласно параграфу 25 *BS 5628-1* параметр *FVOK* является главной прочностной характеристикой кладки при действии сдвига. Параметр *FBT* характеризует прочность кладки на изгиб в соответствии с таблицей 3 – «изгиб перпендикулярный горизонтальному шву кладки» (рисунок 3.25b). Параметры *FT* и *FBT* значительно различаются и поэтому должны быть введены пользователем самостоятельно.

На сегодняшний день отсутствуют какие-либо дополнительные подмодули для расчета кирпичных кладок.

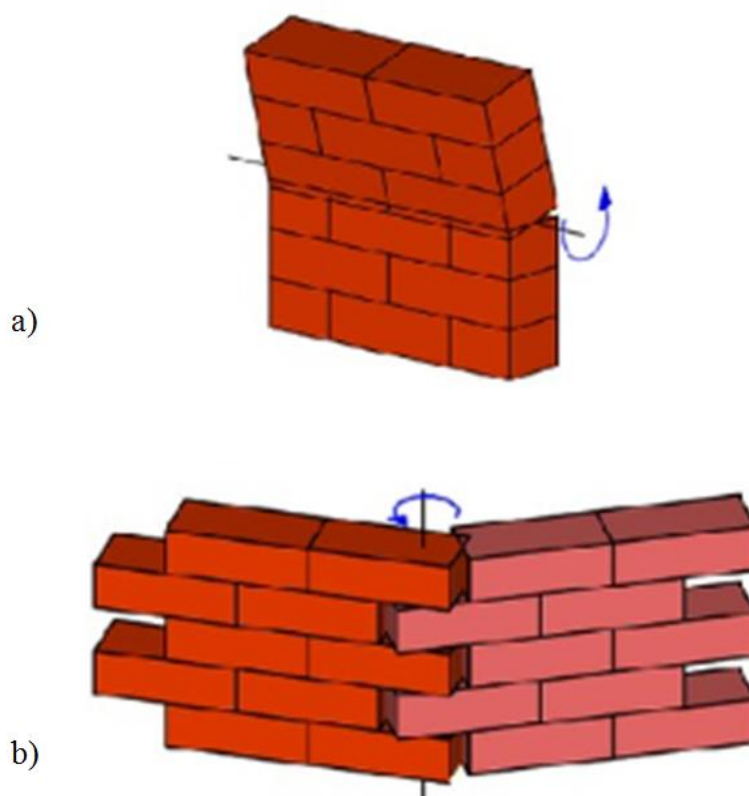


Рис. 3.25 – Виды изгибов в кирпичной кладке: а – изгиб параллельный горизонтальному шву кладки; б - изгиб перпендикулярный горизонтальному шву кладки

3.17 SSLA – Кривые зависимостей напряжений и деформаций

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>EPS</i>	Значение деформации или тип состояния системы <i>SERV</i> Эксплуатационное состояние <i>ULTI</i> Предельное состояние <i>CALC</i> Расчет значений	o/o <i>LIT</i>	-
<i>SIG</i>	Значение напряжения или коэффициента запаса Тип вершины кривой графика: <i>POL</i> Ступенчатый тип <i>SPL</i> Сплошная кривая <i>LIM</i> Без детализации <i>EXT</i> Бесконечная деформация	Н/мм ² <i>LIT</i>	- <i>POL</i>
<i>TEMP</i>	Температурный уровень	град.	0
<i>EPST</i>	Тепловая/температурная деформация	o/o	-
<i>EPSS</i>	Масштабирование или сдвиг значений по ординате <i>SHIF</i> сдвиг значений – <i>EPST</i> < 0 сдвиг значений произведения <i>EPSS•EPST</i> > 1 масштабирование кривой с учетом коэффициента ползучести	-	-
<i>TS</i>	Увеличение натяжения арматуры <i>I</i> Исходная трещина <i>II</i> Окончательная форма трещины <i>I_S</i> При кратковременном нагружении для <i>I</i>	<i>LIT</i>	-

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
	<i>II_S</i> При кратковременном нагружении для <i>II</i>		
	<i>I_F</i> Трещина <i>I</i> , но первая трещина возникает при $f_{ctk,0.05}$		
	<i>I_FS</i> Трещина <i>I_S</i> , но первая трещина возникает при $f_{ctk,0.05}$		
<i>MUET</i>	Процент армирования As/Ab_{eff}	-	-
<i>MNOC</i>	Номер материала (бетона)	-	1
<i>FCTF</i>	Коэффициент прочности бетона его при растяжении f_{ctm}	-	1.0

Кривая напряжения-деформации характеризует зависимость напряжений от возникающих деформаций. Данные кривые используются при проектировании сооружений и нелинейном анализе. Различают три типа кривых зависимости напряжения-деформации:

- *SERV* Кривые, соответствующие эксплуатационному состоянию сооружения, основанные на средних значениях.
- *ULTI* Кривые, соответствующие предельным состояниям сооружения, основанные на расчетных значениях.
- *CALC* Кривые, используемые при нелинейном анализе расчетной системы.

Для нелинейного анализа наиболее надежным и экономичным является метод двойного учета (*Quast*), где истинные значения деформаций оцениваются на основе средних значений, а несущая способность элемента оценивается отдельно исходя из расчетных значений. Данный метод соответствует классическому подходу, используемому при линейном анализе и расчете сооружения в качестве этапа последующей обработки расчетной системы. В государственном стандарте *EN 1992-1* в разделе 5.8. (3) применение данной

методики рассмотрено более детально. Использование данной методики в модулях *AQB/ASE/STAR2* начинается с ввода в систему следующей последовательности команд:

```
DESI ULTI KSV ULD ULD ; NSTR SERV KSV SL SL
```

При решении задач, связанных с устойчивостью элемента, также может потребоваться использование коэффициента запаса устойчивости. Предположение, что данный коэффициент уже учтен при задании жесткости или нагрузки, все зависит от предпочтений пользователя, невозможно на практике, так как нелинейная природа задачи, связанной с устойчивостью, не позволяет использовать один и тот же коэффициент по обе стороны от уравнений. Данная программная особенность контролируется в модулях *AQB/ASE/STAR2* при помощи ввода в систему следующей последовательности команд:

```
DESI ULTI KSV ULD ULD ; NSTR ULTI KSV SLD SLD
```

Несмотря на то, что средние значения характеристик бетона представлены в нормативной документации, для арматурной стали средние значения подобных характеристик отсутствуют. Есть общепринятое утверждение, что при применении арматуры наблюдается увеличение прочности элемента в 1,1 раза. Так как данное значение сопоставимо с коэффициентом запаса прочности, а значение текучести в значительной степени уменьшает жесткость элемента, то в результате сложившейся практики пользователь может использовать параметр *SLD SL* вместо вышеупомянутых *SLD SLD* и *SL SL*.

Так или иначе, в качестве предположения, для оптимизации времени расчета было бы желательно произвести расчет и нелинейный анализ в составе одного прогона системы. Для этого потребуются специальные кривые зависимости, основанные на расчетных значениях прочности, а также значение жесткости, полученное на основе средних значений с учетом специального коэффициента запаса. Данный процесс контролируется в модуле *AQB* при помощи ввода в систему следующей последовательности команд:

В государственном стандарте *EN 1992-1* в разделе 5.8. (3) данная методика упоминается во втором и третьем предложениях. Поскольку в немецком стандарте *NA* в главе 5.7 представлена модифицированная методика с учетом глобального коэффициента запаса всей расчетной системы, равного 1.3, для построения кривой *CALC* (см. таблицу выше) пользователю необходимо определиться в выборе одного из двух методов по определению коэффициента запаса. Значение коэффициента, установленного по умолчанию, равно значению, приведенному в главе 5.7. Следует отметить, что в этом методе не учитывается никакого коэффициента запаса жесткости. С учетом всего вышесказанного, имеется три возможности ввода коэффициента запаса в расчетную систему:

- В соответствии с документом *Heft 600 DAfStB* осуществляется уменьшение значения параметра *ECM* (модуль упругости E_{cm}) при умножении его на коэффициент 0.85, который вводится в расчетную систему при помощи следующей последовательности команд *TVAR ALF-CE 0.85 SCOP DESI*
- Разделение суммарных/общих кривых на коэффициент 1.3, что в данном случае не предусмотрено
- Анализ предельной нагрузки с учетом коэффициента, равного 1.3, и кривых зависимости напряжений и деформаций без учета коэффициента запаса

Если кривые зависимости напряжений и деформаций не установлены в программе по умолчанию, то они должны быть определены пользователем сразу после ввода в расчетную систему материала. Для учета особых эксплуатационных условий каждый набор кривых зависимостей может иметь несколько температурных уровней, которые должны задаваться в системе в порядке возрастания температуры. Вывод кривой зависимости напряжений и деформаций, исходя из введенных в расчетную систему значений характеристик, осуществляется после ввода следующей последовательности команд (3 примера):

SSLA SERV коэф_запаса [LIM/EXT] [TEMP tempval]

SSLA ULTI коэф_запаса [LIM/EXT] [TEMP tempval]

SSLA CALC коэф_запаса [LIM/EXT] [TEMP tempval]

Значения коэффициентов запаса уже predeterminedены, исходя из заданного материала, но при необходимости пользователь может их изменить. Как частный случай, можно изменить стандартную для материала функцию/кривую зависимости напряжений и деформаций вместе с приписанным к данной функции значением коэффициента запаса (все изменения вносятся только в соответствующую/головную командную строку). В различных государственных стандартах проектирования коэффициенты запаса используются совершенно по-разному, в одних нормах характеристики используемого материала делятся на значение коэффициента запаса, в других нормах уменьшаются только максимальное значение напряжений, а значение модуля упругости материала сохраняется. Положительное значение коэффициента запаса выбирается в первом случае, а отрицательное значение выбирается во втором случае. При решении стандартных задач, связанных с проектированием инженерных сооружений, значения коэффициентов запаса материала в модуле *AQB* выбираются в зависимости от условий загрузки и государственных норм проектирования.

При использовании кривых зависимостей типа *CALC* (см. таблицу выше) в программе заложены немного другие правила для учета немецких норм *NA*. Отрицательное значение коэффициента запаса позволяет учесть в расчетной системе кривую, полученную по методике, изложенной в главе 5.7 нормативного документа, а положительное значение коэффициента запаса вводит в систему кривую, полученную по методике из главы 5.8 с учетом коэффициента запаса γ_{ce} , соответствующего определенному материалу с модулем упругости E_{cm} . Значение данного коэффициента (γ_{ce}) уже predeterminedено и находится в *INI*-файле, но несмотря на это оно может быть изменено и использоваться как переходное значение («boxed value») – *TVAR GAM-CE*. Коэффициент запаса, равный 0.0, позволяет деактивировать расчетную кривую зависимости в расчетной системе.

Каждая кривая/график зависимости состоит из нескольких характерных точек – данные, полученных в результате расчетно-теоретических или лабораторных экспериментов, расположенных в области графика в определенной последовательности. Для каждой такой точки указывается, будет ли она соответствовать вершине (линейная полигональная линия; рисунок 3.26 слева) или будет ли частью сглаженной кривой (квадратичная или кубическая парабола; рисунок 3.26 справа).

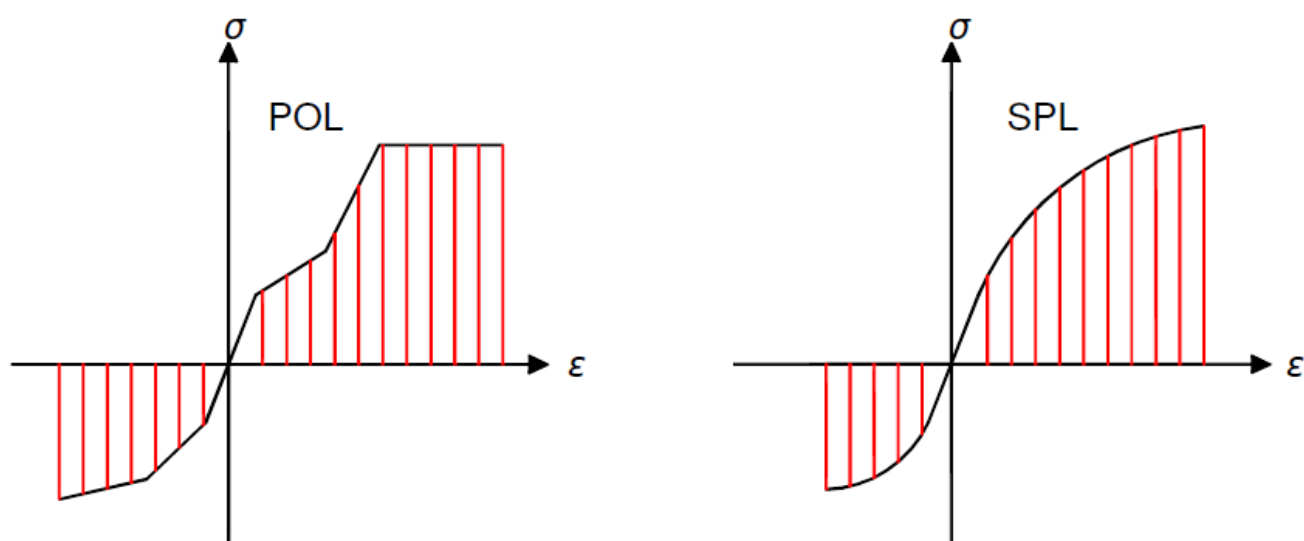


Рис. 3.26 – Типы кривых/графиков зависимостей напряжений и деформаций

Пользователю необходимо убедиться, что при расчете системы будет охвачен достаточно большой диапазон деформаций и что точка нулевым значением также будет распознано системой, как любое другое значение, и включена в состав отчетного графика. Значения деформаций, выходящие за пределы заданного диапазона, будут иметь значения для *TYPE EXT* (бесконечная деформация), соответствующие последнему введенному значению напряжения, и будут проходить по касательной в последней точке кривой графика, при условии положительного значения модуля упругости. Если деформации в системе указаны как *TYPE LIM*, то значения напряжений, находящихся вне заданного диапазона значений, станут нулевыми, что, однако, приведет к проблемам, связанными с расчетными процессами при нелинейных итерациях. Если посмотреть с другой

стороны, то напряжения, находящиеся вне заданного диапазона, при вводе в систему деформаций типа *TYPE EXT* экстраполируются. По умолчанию в программе используется тип *EXT*, однако, при расчете бетона по предельному состоянию используется тип *LIM*. Для бетона без явных значений напряжений и деформаций и без температурных значений можно применить масштабирование при помощи ввода в расчетную систему параметра *EPSS*. Данная особенность работы программы позволяет учесть влияние ползучести на расчетную систему в соответствии с рекомендациями, приведенными в документе *EN 1992*, с учетом параметра ползучести $1 + \varphi$. Следует, однако, отметить, что в таком случае ползучесть учитывается и при переменных воздействиях.

При анализе волокнистых материалов или конечно-элементных сечений по общему методу значения температур в расчетной системе будут учитываться автоматически в соответствии с Еврокодами *EN 1992-1999*. В особых случаях для интерполирования большого количества значений температур пользователь может задействовать область между 2-ым и 15-ым дискретными температурными уровнями – параметр *TEMP*. Параметр *EPST* характеризует температурное деформирование элемента при температуре, значение которой было получено в ходе интерполяции. По умолчанию данное значение будет взято из Еврокода.

При использовании зонального метода анализа сечения будет раздроблены на несколько характерных зон (многоугольников) с разными номерами материалов, где каждая зона имеет постоянное среднее значение температуры для каждого материала – параметр *TEMP*. Также, ввиду возникновения температурной деформации, можно сдвинуть кривую зависимости напряжений и деформаций при помощи команды *EPSS SHIF* (см. таблицу выше), что в результате позволяет непосредственно активировать в системе все собственные напряжения. Данная программная возможность позволяет избежать необходимости поэтапного, так как сечение разбито на зоны, определения температуры в самом сечении.

Влияние бетона, расположенного в границах образовавшихся трещин (усиление натяжения), на расчетную систему может быть учтено путем изменения

функции зависимости напряжений и деформаций для бетона или стали. Изменения функции зависимости напряжений и деформаций арматуры в элементе возможно только при использовании команды *SSLA SERV*. Однако решение данной задачи возможно только в том случае, если процент армирования в элементе достаточно велик, чтобы избежать полного разрыва арматуры. Данное утверждение эквивалентно обязательному условию работы элемента конструкции: напряжение в исходной/начальной трещине, образовавшейся в арматуре, не должно превышать предел текучести материала, из которого она сделана.

Значение процента армирования *MUET* для кольцевидных сечений устанавливается пользователем заранее (или для подобных сечений выбирается арматура, равномерно распределенная по всей площади). Для всех остальных видов поперечных сечений необходимо определить/ввести функцию зависимости напряжений и деформаций.

3.18 MEXT – Дополнительные постоянные воздействия

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала	-	1
<i>EXP</i>	Наименование воздействия	<i>Lit4</i>	-
<i>TYPE</i>	Тип дополнительного воздействия	<i>LIT</i>	!
<i>VAL</i>	Значение параметра материала	*	-
<i>VAL1</i>	Первое дополнительное значение	*	-
<i>VAL2</i>	Второе дополнительное значение	*	-
<i>VAL3</i>	Третье дополнительное значение	*	-
<i>VAL4</i>	4-ое дополнительное значение	*	-
<i>VAL5</i>	5-ое дополнительное значение	*	-
<i>VAL6</i>	6-ое дополнительное значение	*	-
<i>VAL7</i>	7-ое дополнительное значение	*	-
<i>VAL8</i>	8-ое дополнительное значение	*	-
<i>VAL9</i>	9-ое дополнительное значение	*	-
<i>VA10</i>	10-ое дополнительное значение	*	-
	...		
<i>VA20</i>	20-ое дополнительное значение	*	-

С помощью команды *MEXT* пользователь может ввести в расчетную систему специальные случаи воздействия на материал любого типа (сталь, бетон, древесина). Данные воздействия могут быть приложены к различным областям (грань/кромка, плоскость) материала и иметь абсолютно индивидуальные значения для каждой такой области. Сам процесс прикладывания дополнительных воздействий к той или иной области материала осуществляется при помощи параметра *EXP*. По умолчанию значения параметров рассматриваемых случаев воздействия могут содержаться в *INI*-файле. Для того, чтобы иметь представление, какие значения используются в расчетной системе, пользователю необходимо самостоятельно просмотреть содержание данного файла.

В следующих подпунктах будут рассмотрены различные конфигурации параметра *TYPE*.

3.18.1 *AIR* – Взаимодействие с атмосферой

Параметр *AIR* характеризует процент материала, который находится во взаимодействии с атмосферой, и имеет значение от 0.0 до 1.0. Данный параметр используется для учета процесса ползучести и усадки бетона. Параметр *VAL* характеризует воздействие воздушной среды на все сечение элемента. Для учета воздействия на определенных этапах возведения элемента конструкции можно использовать параметры *VAL1-VAL9*.

3.18.2 *CNOM* – Защитный слой бетона

Параметр *CNOM* характеризует защитный слой бетона для арматуры. Значение данного параметра приводится во многих государственных стандартах проектирования, которое зависит от типа окружающей среды, и которое должно храниться в составе *INI*-файлов. Несмотря на это весь диапазон значений толщин защитного слоя, расписанного в соответствующих таблицах, может быть увеличен пользователем в значительной степени.

3.18.3 *CRW* – Ширина раскрытия трещины

Параметр *CRW* используется для учета трещин в материале в процессе расчета и анализа системы.

3.18.4 EIGE – Коэффициенты ползучести


В соответствии с нормативным документом *EN 1992-1* значения коэффициентов ползучести и усадки устанавливаются исходя из следующих условий:

- VAL* коэффициент β_{c0} для оценки степени увеличения деформаций ползучести (0.30)
- VAL1* коэффициент β_{c1} для учета ползучести (1.00)
- VAL2* коэффициент β_{c2} для поэтапного учета ползучести (1.00)
- VAL3* коэффициент β_{cd1} для учета усадки при высыхании (1.00)
- VAL4* коэффициент β_{cd2} для поэтапного учета сушки (1.00)
- VAL5* коэффициент β_{ca1} для учета собственной усадки (1.00)
- VAL6* коэффициент β_{ca2} для поэтапного учета собственной усадки (1.00)

В соответствии с нормативным документом *EN 1992-2 B.104* значения коэффициентов ползучести и усадки устанавливаются исходя из следующих условий:

- VAL* коэффициент ϕ_{d0} для *B.104.4* уравнение *B.127* (1000 / 3200)
- VAL1* коэффициент β_{bc1} для *B.104.3* уравнение *B.125* (1.00)
- VAL2* коэффициент β_{bc2} для *B.104.3* уравнение *B.126* (0.37 / 0.40)
- VAL3* коэффициент β_{cd1} для *B.104.1* уравнение *B.124* (1.00)
- VAL4* коэффициент β_{cd2} для *B.104.1* уравнение *B.124* (0.007 / 0.021)
- VAL5* коэффициент β_{ca1} для *B.104.1* уравнение *B.122* (1.00)
- VAL6* коэффициент β_{ca2} для *B.104.1* уравнение *B.123* (2.80)
- VAL7* коэффициент β_{ca3} для *B.104.1* уравнение *B.123* (1.10)
- VAL8* коэффициент β_{ca4} для *B.104.1* уравнение *B.123* (96.0)

Предупреждение

 Практического опыта по вводу в расчетную схему коэффициентов ползучести и усадки в соответствии с *EN 1992-2 B.104* нет. Данную методику рекомендуется использовать с осторожностью и в исключительных случаях. Данный подход можно активировать, добавив параметр *H* рядом с конкретным классом бетона (см. п.п. 3.13), например. *C 60H*.

Значения явно заданных в соответствии с *EN 1992-1* коэффициентов релаксации арматурных пучков должны быть сведены в одну таблицу. По умолчанию, исходя из общих требований (*abZ*) немецкого нормативного документа *ENC2*, в программе используется типовая таблица коэффициентов для арматурной стали с низкой релаксацией. Создание пользовательской таблицы начинается с заголовка, содержащего до 9 временных интервалов процесса релаксации, без учета воздействия (*EXP*). Последующие записи будут характеризовать потери напряжений в арматуре (отношение R_i/R_m), выраженное в процентах и упорядоченное по возрастанию. Вместо *EXP* необходимо ввести параметр *Rnn*, где индекс *nn* характеризует отношение R_i/R_m , выраженное в процентах.

Таблица потерь растягивающих напряжений, сформированная в программе по умолчанию в соответствии с немецкими нормами проектирования, имеет следующий вид:

MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	-	VAL	1000000	500000	5000	1000	200	10	1
MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	'R55'	VAL	1.2	1.0					
MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	'R60'	VAL	2.8	2.5	1.2				
MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	'R65'	VAL	5.0	4.5	2.0	1.3			
MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	'R70'	VAL	7.0	6.5	3.0	2.0	1.0		
MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	'R75'	VAL	10.0	9.0	4.5	3.0	2.5	1.2	
MEXT	12	TYPE	EIGE	EXP	'R80'	VAL	14.0	13.0	6.5	5.0	4.0	2.0	1.0

3.18.5 *EIGC, EIGS* – Пользовательские графики функций ползучести и усадки

При помощи данных команд пользователь может самостоятельно ввести в расчетную систему функцию/кривую влияния ползучести (*EIGC*) или усадки (*EIGS*) материала. Параметры *VAL*, *VAL2*, *VAL4* и т. д. характеризуют показатель времени, который в расчетной системе имеет единицу измерения дни (абсолютное

значение при анализе усадки *EIGS*, среднеквадратическое значение при анализе ползучести *EIGC*). Значения параметров *VAL1*, *VAL3*, *VAL5* являются значениями функции кривой зависимости, которые в последствии умножаются на исходное пользовательское значение рассматриваемого параметра или значение, полученное из учета условий внешней окружающей среды.

Программа позволяет анализировать несколько функций/кривых ползучести. Отличительной особенностью таких кривых является время начала их загрузки. Для любого интервала ползучести будет выбрана кривая, максимально приближенная к началу текущего временного интервала, а затем сдвинута в направлении истинной начальной точки отсчета.

3.18.6 *KR* – Эквивалентная шероховатость

При помощи команды *KR VAL* в расчетную систему можно ввести эквивалентную шероховатость в соответствии с таблицей 7.13 нормативного документа *EN 1991 1-4*, которая особенно необходима при учете ветровой и волновой нагрузок, действующих на круглые сечения:

Поверхность	Шероховатость/ неровность k [mm]	Поверхность	Шероховатость /неровность k [mm]
Стекло	0.0015	Оцинкованная сталь	0.2
Полированный металл	0.002	Бетон, уплотненный методом центрифугирования	0.2
Однородно окрашенная поверхность (заводская покраска)	0.006	Монолитный бетон, уложенный на месте строительной площадке	1.0
Поверхность, окрашенная распылителем	0.02	Необработанный пиломатериал	2.0
Сталь, прошедшая струйную обработку	0.05	Поверхность с ржавчиной	2.0
Чугун	0.2	Каменная кладка	3.0

ПРИМЕЧАНИЕ: в таблице 4 нормативного документа *DIN 1055 part 4* значения параметра k несколько больше, чем в *EN 1991 1-4*. Параметр *VAL1* характеризует коэффициент трения материала, который должен учитываться при движении потока воздуха или воды вдоль рассматриваемой поверхности, особенно вдоль оси балки.

Поверхность	Коэффициент трения
Гладкая (например, сталь, отделанный бетон)	0.01
Неровная (например, неотделанный бетон, гудрон)	0.02
Очень неровная (например, гофрированная поверхность, рваная поверхность, изогнутая поверхность)	0.04

3.18.7 *TEMP* – Температурное воздействие

При помощи команды *TEMP* пользователь может ввести в расчетную необходимые температурные условия и условия перехода:

<i>VAL</i>	Значение температуры, установленное по умолчанию [$^{\circ}\text{C}$]
<i>VAL1</i>	Значение коэффициента термостойкости/теплопередачи, установленное по умолчанию [$\text{Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2) - \text{W}/(\text{K}\cdot\text{m}^2)$]
<i>VAL2</i>	Коэффициент излучения ε по закону Стефана Больцмана [-] (у абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$)

3.19 *BORE* – Сечение грунтового массива или скважины

См. также: *BLAY*, *VBAX*, *BBLA*, *BTAB*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер сечения грунта	-	1
<i>X</i>	Координаты исходной/начальной точки	[М] ₁₀₀₁	0.0
<i>Y</i>		[М] ₁₀₀₁	0.0
<i>Z</i>		[М] ₁₀₀₁	0.0
<i>NX</i>	Направление сечения грунта.	-	*
<i>NY</i>	По умолчанию сечение ориентировано вдоль направления действия силы тяжести	-	*
<i>NZ</i>	(с момента отсутствия в модуле <i>AQUA</i> : <i>NZ</i> = 1.0)	-	*
<i>ALF</i>	Угол поворота/вращения локальной оси	град.	0.0
<i>HGWL</i>	Нижний уровень грунтовых вод	[М] ₁₀₀₆	0.0
<i>HGWH</i>	Верхний уровень грунтовых вод	[М] ₁₀₀₆	0.0
<i>TITL</i>	Название сечения грунта	<i>LIT32</i>	*

При помощи команды *BORE* в расчетную систему можно ввести грунтовый массив/основание или скважины, вдоль оси которых и задаются необходимые грунты с определенными свойствами. Применение данной команды может быть различным:

- Для задания общих механических характеристик грунтового массива/грунтовых слоев
- Для задания свойств ограниченного грунтового массива, используемых при расчетах или анализе системы, или для полупространственного моделирования системы при помощи модуля *HASE*
- Для задания модуля упругости грунтового массива при использовании в системе свайного фундамента. Значение данной характеристики массива

получено в результате перемножения модуля упругости верхнего грунтового слоя массива и геометрического коэффициента установки (коэффициент установки, фактор формы) с типичным значением в пределах от 0.5 до 2.0. Точнее будет сказать, что в соответствии с гипотезой Винклера грунт с определенным модулем упругости распознается системой как основание с постоянной жесткостью [кН/м³], распределенное в пределах некоторого конструктивного размера свайного элемента, а затем интегрируется по частям путем умножения на ширину сечения сваи. Недостатком основания по модели Винклера является то, что каждый элемент сваи работает независимо от соседних. Поэтому деформируются только те участки основания, которые находятся непосредственно в пределах сваи. Подытожив все вышесказанное, согласно гипотезе Винклера, основание оседает лишь в тех точках, которые находятся непосредственно под свайей, и остается совершенно недеформируемым вне ее воздействия. Для более полного ознакомления с данным вопросом и с примерами использования данной команды, просим вас ознакомиться с п.п. 3.22 данного руководства (*BBLA*).

В большинстве случаев при помощи команды *BTAB* имеется возможность ввода в расчетную систему проектных значений напряжений для учета давления грунта на конструктивный элемент. В дальнейшем эти значения применяются без привязки к исходным/начальным данным.

3.20 *BLAY* – Слои грунтового основания

См. также: *BORE*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>S</i>	Значение ординаты вдоль сечения грунта	[М] ₁₀₀₁	*
<i>MNO</i>	Номер материала исходя из значения ординаты	-	*
<i>ES</i>	Модуль упругости вдоль ординаты сечения	[кН/м ²] ₁₀₉₆	*
<i>MUE</i>	Коэффициент Пуассона	-	<i>CONS</i>
<i>VARI</i>	Тип функции изменения жесткости/упругости основания <i>ES</i> в границах слоя <i>CONS</i> Постоянное значение <i>LINE</i> Линейная функция <i>PARA</i> Функция параболы	<i>Lit4</i>	
<i>DES</i>	Приращение значение <i>ES</i> в текущем слое	[кН/м ²] ₁₀₉₆	
<i>PMAX</i>	Максимальное давление на конце сваи	[кН/м ²] ₁₀₉₆	*
<i>PMAL</i>	Максимальное боковое давление на сваю	[кН/м ²] ₁₀₉₆	*
<i>C</i>	Сцепление с грунтом	[кН/м ²] ₁₀₉₆	*
<i>PHI</i>	Угол внутреннего трения грунта	град.	*
<i>GAM</i>	Удельный вес грунта	кН/м ³	*
<i>GAMA</i>	Удельный вес грунта при полном водонасыщении (плавучесть)	кН/м ³	*

Примечание

Параметры *PHI*, *GAM* и *GAMA* на данный момент не поддерживаются программой при использовании модуля *HASE*.

Команда *BLAY* используется для задания в расчетной системе грунтовых слоев соответствующего сечения, введенного в систему при помощи *BORE*.

Впоследствии все эти данные используются в модуле *HASE* для расчета значений упругих свойств и свойств сопротивления в системе свая-грунт.

Приведенный ниже программный код иллюстрирует функциональность команды *BLAY*:

```
BORE NO #nb X #x Y #y Z #z
BLAY S #s1 ES #Es1 VARI para PMAX #P1
BLAY S #s2 ES #Es2 VARI line DES #dEs2 PMAX #P2
BLAY S #s3 ES #Es3 VARI cons PMAX #P3
BLAY S #s4
```

Сечение скважины *#nb* включает три слоя грунта:

- Первый слой *L1* начинается на глубине *#s1* и заканчивается на глубине *#s2*. Слой *L1* характеризуется параболической функцией распределения жесткости. Так как в данной системе нет явного увеличения жесткости *#dEs1*, то происходит ее непрерывное распределение – итоговое значение жесткости одного слоя будет равно значению жесткости последующего *BLAY* (*#Es2*).

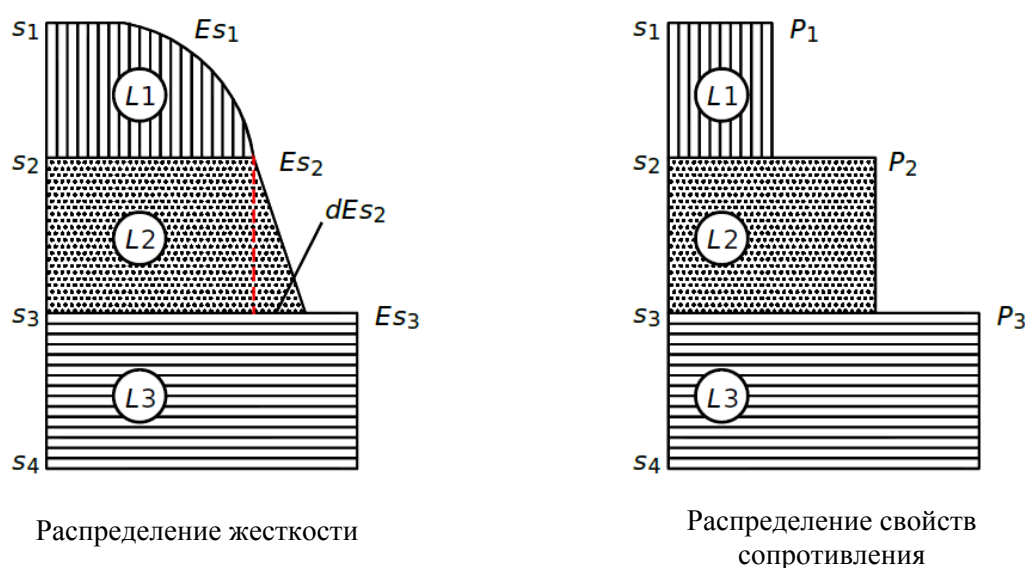


Рис. 3.27 – Распределение свойств между грунтовыми слоями (*BLAY*) вдоль оси скважины (*BORE*)

- Второй слой $L2$ характеризуется линейной функцией распределения жесткости. На этот раз вводится значение $\#dEs2$, в результате итоговое значение жесткости грунтовых слоев будет состоять из $\#Es2$ и $\#dEs2 - \#Es2 + \#dEs2$.
- Третий слой $L3$ характеризуется постоянным значением жесткости $\#Es3$.

Если в системе задан только один грунтовый слой $BLAY$, то его мощность, по умолчанию, будет равняться 999 метрам. Если число слоев (количество команд $BLAY$) больше одного, то последний слой характеризует конечную глубину залегания грунтового массива S , в то время как другие свойства последнего слоя полностью игнорируются расчетной системой.

Помимо модуля упругости ES все остальные свойства слоя (MNO , MUE , $PMAH$, $PMAL$, C , PHI) являются постоянными.

Модуль упругости ES и коэффициент Пуассона MUE , как альтернативный способ, могут быть введены в систему при помощи номера материала, который обладает необходимыми упругими свойствами. Если в составе одного ввода команды $BLAY$ были определены значения параметров MNO , ES и/или MUE , то в процессе анализа системы данные параметры стоят в приоритете относительно тех, которые были введены в систему в составе параметра MNO (номер материала). Если значение коэффициента Пуассона MUE было задано в системе больше 0.0, то значение параметра ES учитывается системой как модуль упругости, а при расчете системы с помощью модуля $HASE$ используется метод Буссинеска – уравнение Буссинеска (подробности см. в руководстве к модулю $HASE$).

По умолчанию (без ввода) нелинейные свойства сопротивления грунта ($PMAH$, $PMAL$ и C) отключены, что означает, что продольные усилия в узлах свай не ограничены (анализ упругости). Как и в предыдущем случае (по умолчанию), ввод значений свойств сопротивления меньше или равных нулю приведет к тому, что контактные продольные усилия в свае будут неограниченны. Любой ввод

значений свойств сопротивления, больше нуля, активирует нелинейность вдоль сваи.

Примечание

- Для полноценной интерполяции свойств грунтового основания/массива обязательным условием является, чтобы все заданные пользователем скважины (*BORE*) имели одинаковое количество грунтовых слоев (*BLAY*).
- Для обеспечения безошибочной работы программы в процессе ввода свойств сопротивления грунтового слоя *BLAY* требуется, чтобы свойства сопротивления слоя каждой из задействованных скважин были введены, либо не введены пользователем вообще. В противном случае полученные в процессе интерполяции значения свойств грунтового массива могут иметь непредсказуемый характер. Другими словами, в грунтовом слое, в котором свойства сопротивления в пределах одних скважин были заданы пользователем, а в пределах других нет, скорее всего, может привести к нежелательным результатам и сбоям в работе программы.

3.21 ВВАХ – Свойства грунтового основания вдоль оси сваи – соосное напластование

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>S1</i>	Начальное значение ординаты	[m] ₁₀₀₁	*
<i>S2</i>	Конечное значение ординаты	[m] ₁₀₀₁	999.99
<i>K0</i>	Постоянное распределение параметров системы свая-грунт	[кН/м ²]	0
<i>K1</i>	Распределение в соответствии с функцией квадратного корня	1096	0
<i>K2</i>	--/-- с линейной функцией	“	0
<i>K3</i>	--/-- с квадратичной функцией	“	0
<i>M0</i>	Нагрузка (например, отрицательное поверхностное трение)	[кН/м] ₁₀₉₅	0
<i>C0</i>	Максимальное поверхностное трение	[кН/м] ₁₀₉₅	0
<i>TANR</i>	Угловой коэффициент трения грунта/сваи	-	
<i>TAND</i>	Коэффициент дилатансии грунта/сваи	-	
<i>KSIG</i>	Коэффициент бокового давления	-	0.0
<i>D0</i>	Постоянная вращательная жесткость	[кНм] ₁₀₉₉	0
<i>D2</i>	Линейная вращательная жесткость	[кНм] ₁₀₉₉	0
<i>CA0</i>	Постоянное демпфирование колебаний вдоль оси	[кНсек/м ²] ₁₂₂₀	0
<i>CA2</i>	Линейное демпфирование колебаний вдоль оси	[кН] ₁₁₀₁	0
<i>PMAX</i>	Максимальное усилие на конце сваи (только при удлиненных сваях)		0

Примечание

Значения ординат $S1$ и $S2$ откладываются вдоль оси сечения скважины, введенной в расчетную систему с помощью команды *BORE* и отвечают за описание характерных слоев в профиле скважины.

В системе свая-грунт продольные коэффициенты постели описывают поверхностное трение сваи о грунт вдоль ее оси. Данный тип воздействия на элемент конструкции (свая) зависит от значений деформаций и от действия поперечного усилия, возникающего в результате бокового давления грунтового массива на сваю.

Закон распределения поверхностного трения в зависимости от деформаций представлен на рисунке 3.28. Параметр k отвечает за наклон развития кривой (модуля деформации) и может быть задан не только как постоянное значение $K0$, но также как функция квадратного корня $K1$, линейная функция $K2$ и квадратичная функция $K3$ (см. рис. 3.29). Таким образом, модуль деформации может быть непостоянным по глубине. Положительное значение нагрузки $M0$ прикладывает на сваю в направлении ее головки, что соответствует переносу начала координат характерной зависимости распределения поверхностного трения от деформации. В качестве параметров разрушения используется значение текучего поверхностного трения $C0$ и действующее вертикальное напряжение SIG , сумма которых не должна превышать значение параметра $C0$. Все дополнительные сведения и рекомендации, связанные с моделированием и расчетом грунтового основания с помощью коэффициента постели, содержатся п.п. 3.22 данного руководства ([BBLA](#)).

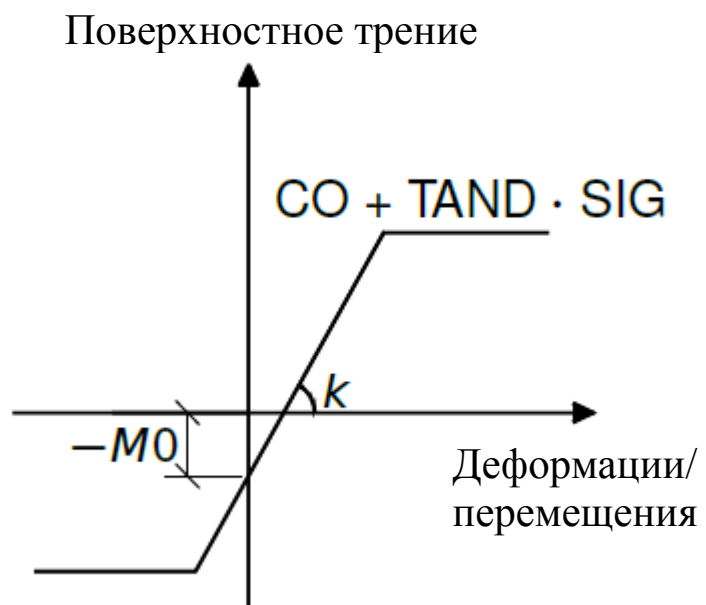


Рис. 3.28 – Зависимость свойств грунта вдоль оси сваи

3.22 BBLA – Поперечные коэффициенты постели для сваи (горизонтальная слоистость)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>S1</i>	Начальное значение ординаты	[m] ₁₀₀₁	*
<i>S2</i>	Конечное значение ординаты	[m] ₁₀₀₁	999.99
<i>K0</i>	Постоянное распределение параметров в зависимости от глубины залегания слоя	[кН/м ²]	0
<i>K1</i>	Распределение в соответствии с функцией квадратного корня	1096	0
<i>K2</i>	--/-- с линейной функцией	“	0
<i>K3</i>	--/-- с квадратичной функцией	“	0
<i>P0</i>	Форм-факторы (коэффициенты формы,	-	1
<i>P1</i>	геометрические характеристики),	-	1
<i>P2</i>	изменяющиеся вблизи границы (кромки)	-	1
<i>P3</i>	грунтового слоя	-	1
<i>PMA1</i>	Максимальное сжимающее усилие в <i>S1</i>	[кН/м] ₁₀₉₅	-
<i>PMA2</i>	Максимальное сжимающее усилие в <i>S2</i>	[кН/м] ₁₀₉₅	-
<i>CL0</i>	Постоянное демпфирование поперечных колебаний	[кНсек/м ²] ₁₂₂₀	0
<i>CL1</i>	Демпфирование по линейной функции	“	0
<i>CL2</i>	--/-- по параболической функции	“	0
<i>CL3</i>	--/-- по квадратичной функции	“	0
<i>SM0</i>	Постоянное распределение масс	[т/м] ₁₁₈₁	0
<i>SM2</i>	Линейное распределение масс	[т/м] ₁₁₈₁	0

Примечание

Значения ординат *S1* и *S2* откладываются вдоль оси сечения скважины, введенной в расчетную систему с помощью команды **BORE** и отвечает за описание характерных слоев в профиле скважины.

У упругих оснований/слоев основания существует множество взаимосвязанных между собой параметров. С учетом этого программа объединяет все эти значения в особые свойства, которые характеризуют границу (кромку) грунтового слоя в расчетной системе.

Все параметры команд *BBAX* и *BBLA* вводятся вслед за командой *BORE* в порядке, определяемом значением ординаты слоев скважины *s*. Все данные по ординате *s* относятся к параметрической системе координат. По умолчанию в программе используется глобальная ось *z*.

В пределах сечения основания значения всех свойств и параметров (например, *K*) интерполируются:

$$K = K0 + K1 \cdot \left(\frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \right)^{1/2} + K2 \cdot \left(\frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \right) + K3 \cdot \left(\frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \right)^2 \quad (3.132)$$

Свойства грунтовой сваи, расположенной в начале сечения основания, соответствуют постоянному закону распределения *K0*, а в конце сечения они соответствуют *K0 + K1 + K2 + K3*. Точнее будет сказать, что отдельные параметры расчетной системы свая-грунт соответствуют постоянному, параболическому, линейному и квадратичному законам распределения. По умолчанию значение нового слоя с ординатой *S1* равно последнему значению ординаты *S2* предыдущего слоя. По умолчанию данное значение *S2* составляет 999.99 м.

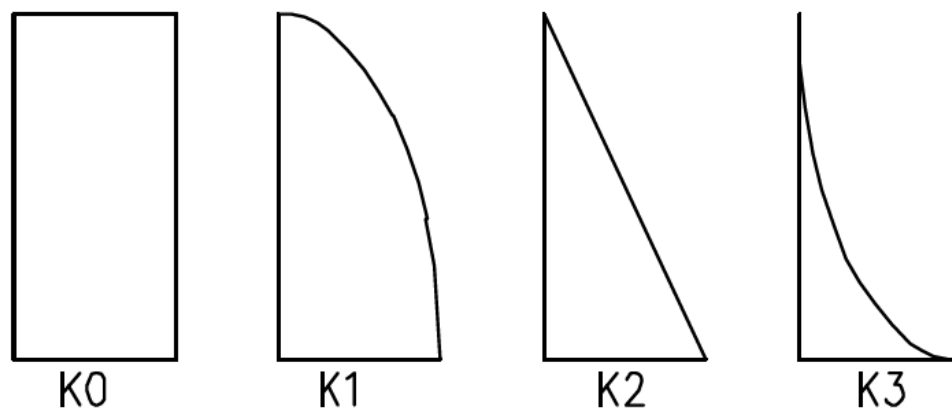


Рис. 3.29 – Функции изменения свойств участков грунтового основания

Форм-факторы, используемые для учета изменения геометрии границы (кромки) основания, эффективны при разделении системы свая-грунт на четыре квадранта (угол секции 0, 90, 180 и 270 градусов). То есть поперечный коэффициент постели может быть изменен в зависимости от того или иного места в самом сечении сваи. Данный угол ориентирован относительно локальной оси z . Для линейного анализа фактор $(P0 + P2)/2$ используется при основном изгибе (MY, VZ), тогда как $(P1 + P3)/2$ используется при поперечном изгибе (MZ, VY).

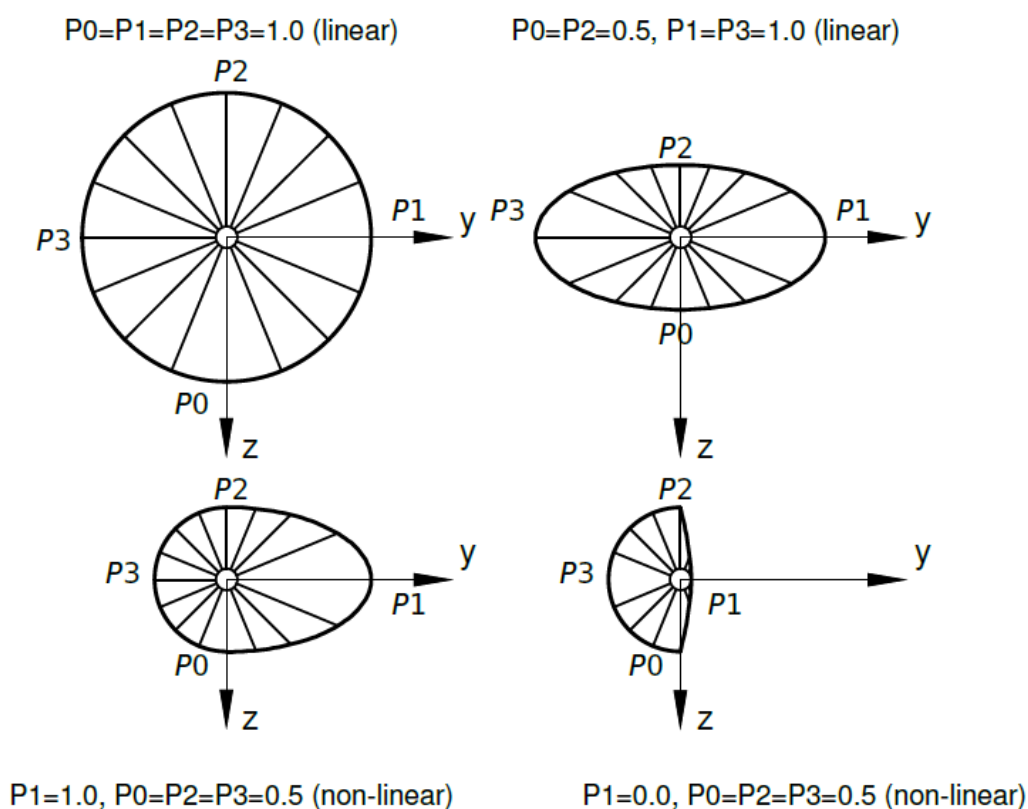


Рис. 3.30 – Распределение грунтовых слоев в поперечном направлении: *linear* – линейная функция; *non-linear* – нелинейная функция

Значение форм-фактора формируется из того условия, что действующее в основании на определенную длину усилие p_L характеризуется упрощенной зависимостью от деформаций u_L :

$$\varpi p_L = D \cdot C_l \cdot u_L = D \cdot \frac{E_s}{D_{eff}} \cdot u_L \quad (3.133)$$

В соответствии с нормами *DIN*, как пример, $D_{eff} = \min(D, 1.0)$. Для более сложных случаев, когда нагрузка на грунтовое основание неоднородна, а больше напоминает косинусоиду, возможны, конечно, другие значения. Поэтому в некоторых нормативных документах для получения наиболее неблагоприятных результатов рекомендуется использовать любое значение в пределах от 0.5 до 2.0. Подытожив вышесказанное можно сказать, что независимо от условий ПК *SOFiSTiK* не изменит предписанные нормами и пользователем проектные значения характеристик.

Для грунтового основания в направлении оси сваи аналогичный форм-фактор может быть рассчитан с опорой на модуль сдвига вместо модуля упругости (модуль деформации слоя):

$$p_A = \pi \cdot D \cdot C_a \cdot u_a = \pi \cdot D \cdot \frac{E_s}{2 \cdot (1 + \mu) \cdot D_{eff}} \cdot u_a \quad (3.134)$$

Таким образом, форм-факторы в целом компенсируют друг друга, и при вводе грунтовых слоев вдоль оси сваи достаточно использовать модуль упругости E_s . В большинстве случаев максимальное поверхностное трение системы свая-грунт является наиболее важной частью уравнения. Однако нужно учитывать, что для данного параметра обязательно должно быть указано хоть какое-нибудь значение, иначе вообще в системе свая-грунт вообще не будет никакого трения.

Кроме того, существует довольно сложный подход для учета различных взаимодействий в обоих направлениях расчетной системы. Поверхностное трение имеет разную природу:

$$\sigma = K_{SIG} \cdot \sigma_v + K(x) \cdot [v(x) + TAND \cdot u(x)] \quad (3.135)$$

$$\tau = K(x) \cdot u(x) < TANR \cdot \sigma + C0 \quad (3.136)$$

В первой части уравнения 3.135 напряжение возникает в результате действия вертикального давления грунта и учета коэффициента горизонтального давления. Во второй части давление характеризуется упругими постоянными, которые содержат понятие жесткости и дилатансии.

3.23 ВТАВ - Давление на грунт у подошвы фундамента

См. также: [BORE](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>OPT</i>	Вводные параметры: <i>B</i> ширина фундамента <i>S</i> давление грунта Аб.х:у таблицы свойств грунта А6.1 – А6.8 с учетом дополнительных сведений по их консистенции у (только таблицы А6.6 – А6.8): : <i>S</i> плотный грунт : <i>H</i> полутвердый грунт : <i>F</i> твердый грунт	<i>LIT8</i>	-
<i>D</i>	Глубина забивки сваи	[М] ¹⁰⁰⁶	*
<i>V1</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₁	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V2</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₂	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V3</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₃	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V4</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₄	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V5</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₅	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V6</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₆	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V7</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₇	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V8</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₈	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V9</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₉	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>V10</i>	Расчетное напряжение при ширине <i>b</i> ₁₀	[кН/м ²] ¹⁰⁸⁹	*
<i>FACS</i>	Фактор/концентратор напряжений (см. <i>DIN A6.4</i>)	-	1.0

Команды *BTAB* позволяет ввести в систему расчетное давление грунта на фундамент, что в простых случаях позволяет избежать полноценного геотехнического расчета системы.

Для ввода данной команды в систему существует несколько способов:

- Пользователь задает только одно значение *V1* для учета давления грунта без каких-либо дополнительных параметров *OPT*:

BTAB OPT - V1 240

- Пользователь может ввести в систему параметр для *OPT*, который обеспечивает привязку со значениями свойств грунта, приведенных в таблицах нормативного документа *DIN 1054: A6.1, A6.2, A6.5, A6.6, A6.7* или *A6.8*. Также при данном вводе учитываются дополнительные приложения (только таблицы *A6.6 – A6.8*). Например:

BTAB OPT A6.1

или

BTAB OPT A6.6:F

- Пользователь при помощи команды *OPT B* может ввести в расчетную систему требуемые значения ширин *V1 – V10*, а затем произвольное количество точек, распределенных по всей глубине залегания фундамента в грунтовом массиве, и к которым будет приложено давление от грунта (*OPT S*). Глубина расположения данной точки зависит от значения параметра *D*. Например:

<i>BTAB D</i>	<i>OPT</i>	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>V3</i>	<i>V4</i>	<i>V5</i>
-	B	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1.0	S	210	210	210	210	210
2.0	S	280	420	560	700	700
3.0	S	380	520	660	800	800
4.0	S	480	620	760	900	900

3.24 SMAT – Свойства пружин и шарнирных соединений в балке

См. также: [SFLA](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер материала для пружины	-	!
<i>LTYP</i>	Тип связи/соединительного элемента: <i>STD</i> Стандартная пружины <i>IHNG</i> Неявный/косвенный шарнир <i>PMM</i> Взаимодействие <i>PMM</i>	-	*
<i>MTYP</i>	Тип материала: <i>PLAS</i> Упругопластический, анизотропный <i>PISO</i> Упругопластический, изотропное упрочнение <i>PKIN</i> Упругопластический, кинематическое упрочнение <i>HYPE</i> Сверхупругий	-	<i>PLAS</i>
Прочностные свойства соединительного элемента			
<i>P+</i>	Прочность на растяжение (≥ 0)	[кН] ₁₁₀₁	-
<i>P-</i>	Прочность на сжатие (≤ 0)	[кН] ₁₁₀₁	-(<i>P+</i>)
<i>VY+</i>	Прочность на сдвиг V_y (≥ 0)	[кН] ₁₁₀₁	-
<i>VY-</i>	Прочность на сдвиг V_y (≤ 0)	[кН] ₁₁₀₁	-(<i>VY+</i>)
<i>VZ+</i>	Прочность на сдвиг V_z (≥ 0)	[кН] ₁₁₀₁	-
<i>VZ-</i>	Прочность на сдвиг V_z (≤ 0)	[кН] ₁₁₀₁	-(<i>VZ+</i>)
<i>MY+</i>	Прочность на изгиб M_y (≥ 0)	[кНм] ₁₁₀₄	-
<i>MY-</i>	Прочность на изгиб M_y (≤ 0)	[кНм] ₁₁₀₄	-(<i>MY+</i>)
<i>MZ+</i>	Прочность на изгиб M_z (≥ 0)	[кНм] ₁₁₀₄	-
<i>MZ-</i>	Прочность на изгиб M_z (≤ 0)	[кНм] ₁₁₀₄	-(<i>MZ+</i>)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
Определяющие взаимодействия			
<i>ALPH</i>	Интерполяция значений M_y - M_z	-	0.0
<i>P1</i>	не используется		
<i>P2</i>	не используется		
<i>TITL</i>	Наименование материала для пружины	<i>LIT32</i>	-

Общие сведения

Команда *SMAT* позволяет ввести в расчетную систему материал для пружинного элемента с соответствующими свойствами (заголовок). Задание характеристик материала для пружины осуществляется сразу после команды *SFLA*, можно сказать, что команды *SMAT* и *SFLA* позволяют в полной мере охарактеризовать материал, используемый для пружинных элементов.

LTYP

В программе доступны следующие типы соединительных элементов:

STD Стандартный материал для пружинного элемента *SFLA* и *SARB* (см. п.п. 3.25 текущего руководства, п.п. 5.13 руководства по *SOFiMSHC* соответственно) типов *P*, *PT*, *M*.

IHNG Материал вводится для определения соотношения между возникающим усилием от реакции в конце балке и соответствующим перемещением (неявный/косвенный шарнир) (советуем также ознакомиться с командой *SARB TYPE*).

PMM Особый материал вводится для оценки взаимодействия между усилиями P - M_y - M_z . В системе доступны реакции, аналогичные *IHNG*; усилия M_y и M_z дополнительно взаимосвязаны между собой показателем интерполяции α (см. команду *ALPH*).

Если в расчетной системе тип соединительного элемента явно не определен, последующий анализ выполняется на основе следующего ввода, в частности на основе следующих типов *SFLA* и *SARB* (см. п.п. 3.25 текущего руководства, п.п. 5.13 руководства по *SOFiMSHC* соответственно).

LTYP

В программе доступны следующие типы материалов:

PLAS *Упругопластический, анизотропный материал.* При действии начальной нагрузки на материал, возникающее усилие начинает увеличиваться в соответствии с определенной функцией (законом) работы материала (пластическое упрочнение). С другой стороны, разгрузка и повторное нагружение материала являются линейными упругими воздействиями и характеризуются модулем разгрузки/повторного нагружения E_{ur} . В анизотропной модели материала принято различать растяжение и сжатие с взаимно независимым режимом упрочнения (закалки) в соответствующих направлениях. В процессе анализа конструктивных элементов с различными сжатыми и растянутыми участками, применение рассматриваемой функции (закона) работы материала может быть несимметрично относительно плоскости элемента.

PISO *Функция работы упругопластического материала с изотропным упрочнением.* Данная функция аналогична функции *PLAS*, за исключением того, что развитие деформаций при пластическом упрочнении не дифференцируется в зависимости от параметров растяжения и сжатия; процесс образования пластических деформаций при растяжении материала, как пример, сопровождается его упрочнением в сжатой зоне и наоборот.

Этот тип материала обычно характеризуется функцией с симметричным распределением свойств для получения соответствующего отклика системы при действии в ней растягивающих и сжимающих усилий. Однако функциональность использования данного материала не ограничивается лишь симметричным случаем.

PKIN *Функция работы упругопластического материала с кинематическим упрочнением.* В соответствии с требованиями, косаемыми кинематического упрочнения, начальный диапазон упругости сохраняется во время роста пластических деформаций – в отличие от изотропных и анизотропных случаев упрочнения. В этой модели материала эффект упрочнения представлен сдвигом, а не растяжением его упругой области.

Этот тип материала обычно характеризуется функцией с симметричным распределением свойств для получения соответствующего отклика системы при действии в ней растягивающих и сжимающих усилий с положительными конечными градиентами. Однако функциональность использования данного материала не ограничивается лишь симметричным случаем.

HYPE *Функция работы сверхупругого материала.* Усилие, возникающее в материале, как при прикладывании к нему нагрузки, так и при его разгрузке, увеличивается в соответствии с определенной функцией работы. Поскольку программа не различает процессы загрузки и разгрузки между собой, в системе не возникает пластических деформаций – материал является упругим.

Типы материалов *PISO* и *PKIN* недоступны при использовании контактных элементов типов *IHNG* и *PMM*.

Дополнительную информацию о характеристиках соответствующего материала смотрите в п.п. 3.24.1 данного руководства.

Прочностные свойства соединительного элемента

Для отдельных реакций в соединительных элементах можно задать верхний и нижний пределы значений. Эти граничные условия могут быть привязаны к соответствующим функциям работы материала (см. п.п. 3.25 *SFLA*) в процессе их определения в расчетной системе.

Примечание

Сама по себе функция не включает никаких фактических ограничений, касаемых допустимых значений возникающих усилий/реакций. Фактическое значение усилия, а вместе с ним и границы допустимого значения, должны быть введены в систему вместе с соответствующей функцией (законом) работы материала.

Особое значение имеют прочность на растяжение $P+$ и прочность на сжатие $P-$. Определив значение этих прочностных характеристик можно определить другие реакции R относительно нагрузки, действующей вдоль оси соединительного элемента. Ввод в систему осевого (нормального) усилия, зависящего от семейства кривых функций работы материала (см. команду *SFLA LEV*), для конкретной реакции R характеризует зависимость между действующим осевым усилием и реакцией R (зависимость $P-R$). При $P \geq P+$ или $P \leq P-$ в результате взаимодействия с реакцией $R \equiv 0.0$; в случае действия осевого усилия на горизонтальные плоскости допустимое значение реакции R между ними определяется пользовательским семейством функций работы материала.

Значения прочностных характеристик вводятся для соединительных элементов типов *IHNG* и *PMM*.

ALPH

Показатель интерполяции $\alpha \geq 1.0$ характеризует зависимость между усилиями M_y и M_z в соответствии с формулой:

$$\left(\frac{M_y}{M_{y,lim}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_z}{M_{z,lim}}\right)^\alpha \leq 1 \quad (3.137)$$

Например, при значении $ALPH = 1.0$ выполняется линейная интерполяция между усилиями M_y и M_z . При увеличении экспоненты также увеличивается полнота и точность интерполяционной кривой; при значении $ALPH = 2.0$ интерполяционная кривая имеет форму эллипса.

Значение $ALPH = 0.0$, установленное в программе по умолчанию, характеризует отдельный учет влияния усилий M_y и M_z на систему (в математическом плане данное утверждение имеет вид: в уравнении 3.137 $\alpha \rightarrow \infty$).

Показатель интерполяции EXP активен только соединительного элемента типа PMM .

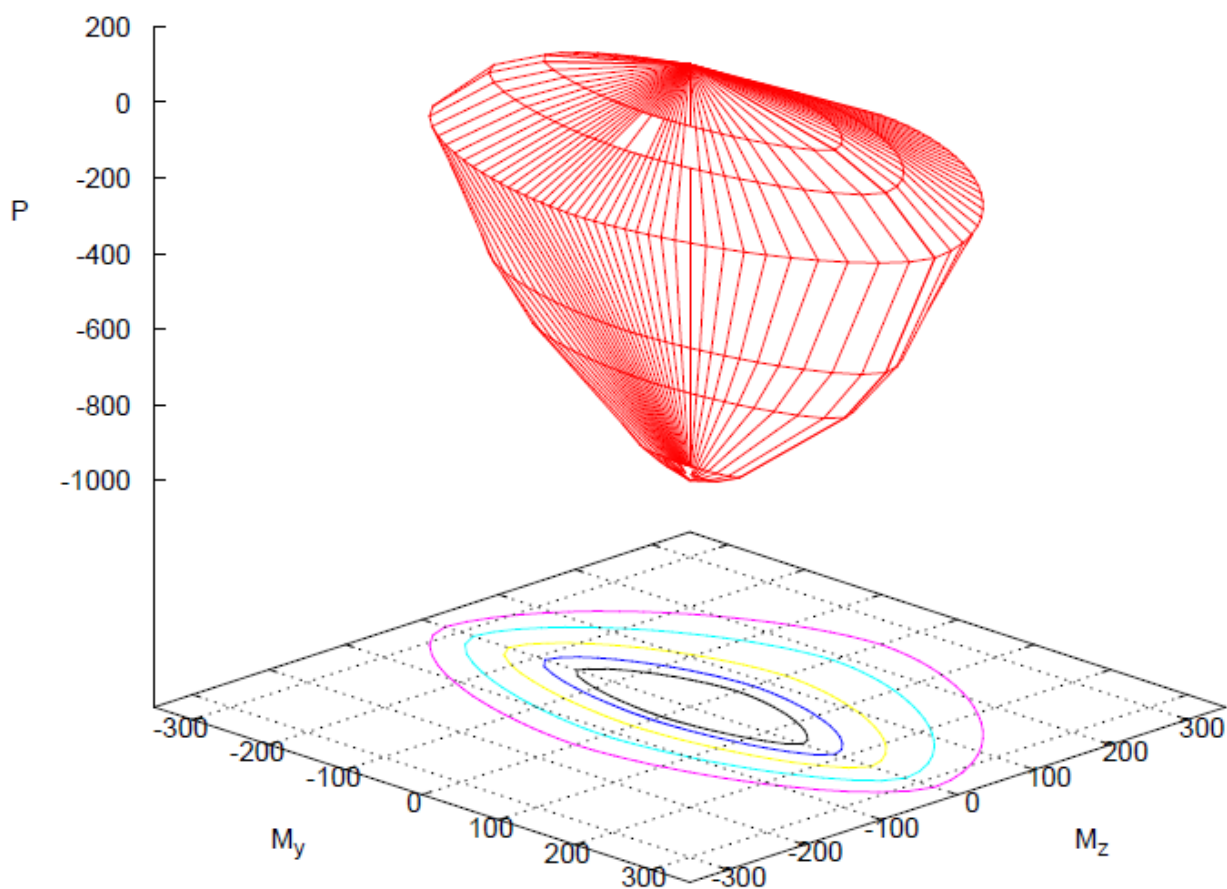


Рис. 3.31 – График зависимости P - M_y - M_z усилий

3.24.1 Примеры материала и их характеристики

В папке с примерами [ase.dat/english/spring](#) приведены различия между *AQUA-SMAT...MTYP* и *PLAS-PISO-PKIN-HYPE*. Для получения дополнительной информации просим вас ознакомиться с файлом [ase.dat/english/spring/a1_spring_overview.dat](#).

Ниже приведены файлы с примерами использования различных типов материала:

[ase.dat/english/spring/spring_law_1_plas.dat](#)

[ase.dat/english/spring/spring_law_2_piso.dat](#)

[ase.dat/english/spring/spring_law_3_pkin.dat](#)

[ase.dat/english/spring/spring_law_4_hype.dat](#)

В данных примерах используются те же функции работы материала, что и в *SMAT* (рисунок 3.33). Единственное различие заключается в том, что функция материала *PKIN* имеет восходящий конец кривой графика (ознакомьтесь с примечанием к функции *PKIN* – рисунок 3.33). Нормальные функции пластичности материала (*MTYP PLAS+PISO+HYPE*) должны иметь горизонтальный конец кривой графика (или предельную поверхность), чтобы можно было четко определить предельное значение прочности материала (рисунок 3.33).

Четыре типа материала *PLAS*, *PISO*, *PKIN* и *HYPE* характеризуются различной реакцией на действие одиночной циклической нагрузки. Результирующие кривые зависимости усилий и перемещений (деформаций) представлены на рисунке 3.33.

***PLAS* Анизотропное упрочнение**

Пластические деформации, возникающие в процессе упрочнения материала, влияют на развитие области упругих напряжений. В анизотропной модели материала принято различать растяжение и сжатие с взаимно независимым режимом упрочнения (заковки) в соответствующих направлениях (растяжение/сжатие). Как пример, упрочнение, происходящее в процессе растяжения элемента, не влияет на его текущую прочность при сжатии⁵. Функция текучести в полной мере характеризует все соответствующие различия между реакцией материала при его растяжении и сжатии:

$$f := \begin{cases} |\sigma| - |f_{y,c}(\epsilon_{p,c})| & \text{for } \sigma \leq 0 \\ \sigma - f_{y,t}(\epsilon_{p,t}) & \text{for } \sigma > 0 \end{cases} \quad (3.138)$$

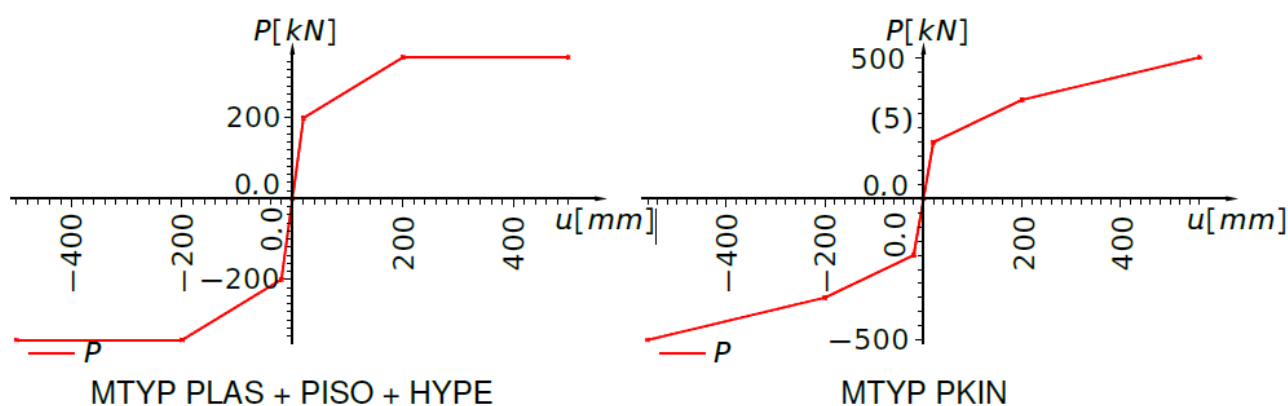


Рис. 3.32 – Кривая функции работы (зависимости P - u) пружинных элементов

В примере (рис. 3.33) начальное упрочнение при растяжении образца (1) сопровождается шагом разгрузки размером до $\sigma = 0$ (2). В настоящий момент упрочнение материала при действии на него сжимающего усилия не активировано в расчетной системе. С учетом данного утверждения можно сказать, что продолжающаяся разгрузка активируется вслед за начальным нагружением, которое характеризуется функцией работы материала при действии на него сжимающего усилия (3).

⁵ Данное предположение особенно справедливо для материалов, которые характеризуются разными и квазинеzависимыми закономерностями в поведении при их растяжении и сжатии, например, бетона. Функции работы (поведения) материала при его растяжении и сжатии в данном случае обычно несимметричны.

Изотропное упрочнение

В отличие от анизотропного подхода, данный подход характеризуется учетом значений пластических деформаций, но только при полной независимости от направления воздействия на материал (сжатие/растяжение). Процесс образования пластических деформаций при растяжении материала, как пример, сопровождается его упрочнением в сжатой зоне и наоборот⁶. Следовательно, в функции текучести должна учитываться такая переменная упрочнения, которая описывала бы реакцию материала при действии на него растягивающего и сжимающего усилия:

$$f := \begin{cases} |\sigma| - |f_{y,c}(-\kappa_p)| & \text{for } \sigma \leq 0 \\ \sigma - f_{y,t}(\kappa_p) & \text{for } \sigma > 0 \end{cases} \quad (3.139)$$

$$\kappa_p := \max(|\epsilon_{p,c}|, \epsilon_{p,t}) \quad (3.140)$$

В примере (рис. 3.33) начальное упрочнение при растяжении образца (1) сопровождается шагом разгрузки размером до $\sigma = 0$ (2).. При действии сжимающего усилия известное ранее значение деформации, возникающее в материале при его упрочнении, также эффективно. Использование данного значения позволяет увеличить длину участка на графике, характеризующего участок упругих деформаций (4).

PKIN Кинематическое упрочнение

Для большинства материалов характерно следующее – пластическая деформация, возникающая в материале при его растяжении, приводит к снижению предела текучести при сжатии, а конкретнее при последующих прикладываниях сжимающего усилия (и наоборот).

Для элементов, выполненных из стали/металла, этот эффект известен как эффект Баушингера. Модель кинематического упрочнения описывается данным

⁶ Функции реакции/работы материала при изотропном упрочнении обычно симметричны как при действии растягивающих, так и сжимающих усилий, однако они не ограничиваются лишь симметричным случаем.

эффектом и характеризует процесс пластического упрочнения как процесс преобразования начального предела текучести f_{y0} без изменения первоначальной длины области упругих деформаций на графике. Математически дынный эффект учитывается путем введения в уравнение так называемого обратного напряжения q , значение которого зависит от значения пластической деформации ϵ_p .⁷

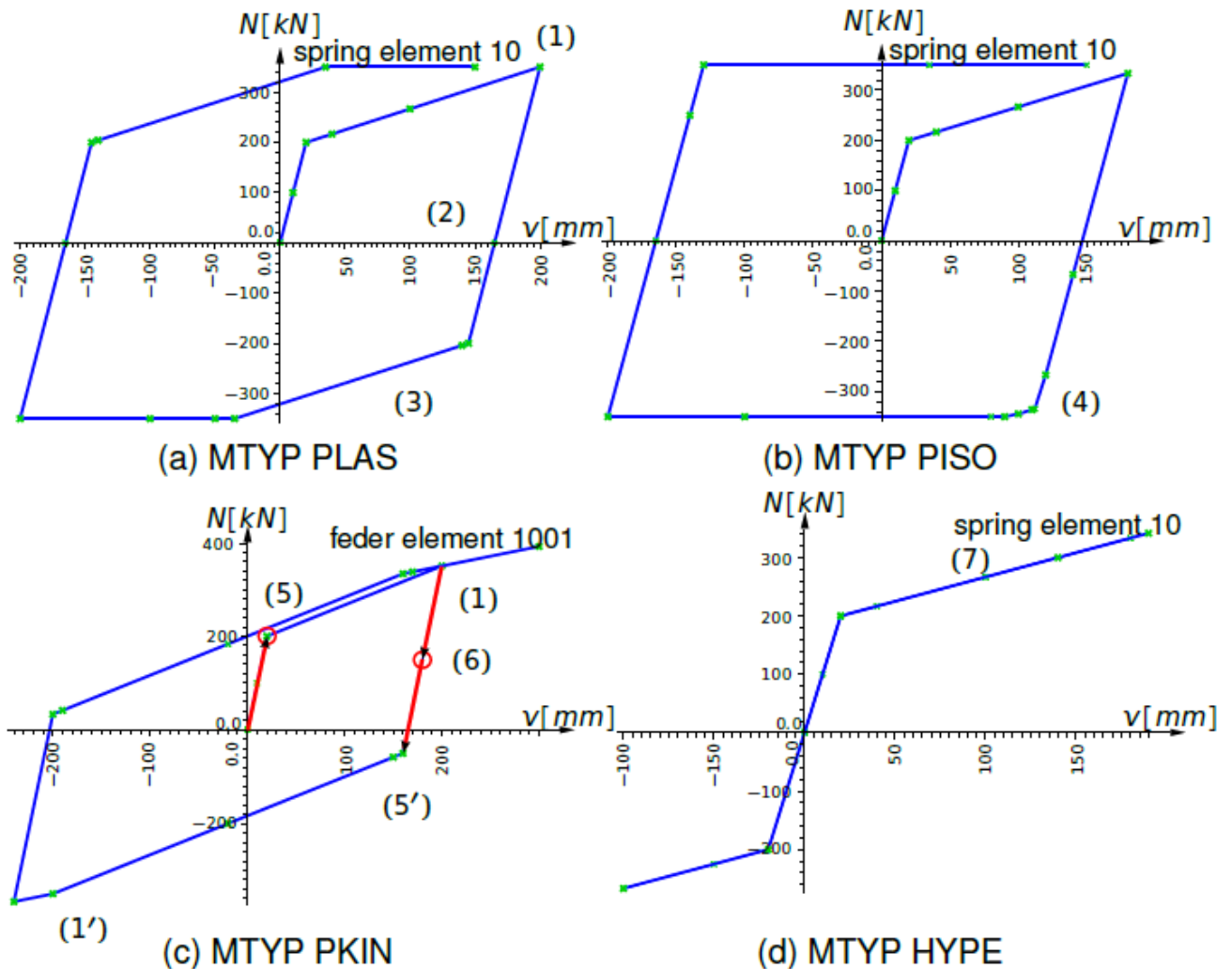


Рис. 3.33 – График зависимости напряжения-деформации для материалов типов *PLAS-PISO-PKIN-HYPE* (параметр *MTYP*): *spring element* (анг. яз.), *feder element* (немец. яз.) – пружинный элемент

Функция текучести материала теперь имеет вид:

⁷ Функции/законы работы материала при их кинематическом упрочнении обычно симметричны при действии растягивающих и сжимающих усилий, а также они имеют положительные конечные градиенты.

$$f := |\sigma - q(\epsilon_p)| - f_{y0} \quad (3.141)$$

Принятая модель кинематического упрочнения характеризуется следующими условиями:

- Исходное/первоначальное нагружение соответствует оригинальной функции/закону работы материала.
- Исходная длина области упругих деформаций материала, определяемая значением начального предела текучести f_{y0} , остается неизменной.
- Область допустимых напряжений ограничена конечным участком кривой графика, определяемого функцией работы материала.
- Достаточная пластичность материала, как в положительном, так и в отрицательном направлении определяется конечным участком кривой на графике. Также возможно моделирование поведения материала за пределами текучести f_{y0} при его растяжении – нелинейная функция (рис. 3.36).

Рассмотрим результат расчета на основе предоставленной функции материала в соответствии с дискретно-линейными кривыми, как показано на рисунке 3.33. Важной частью графика функции является его первый участок (5), который характеризует участок разгрузки. Участок разгрузки, начинающийся из точки (1), не заканчивается в точке со значением $\sigma = 0$, он заканчивается в точке (6). Из этой точки первая линейная (упругая) часть переходит в (5'). В дальнейшем видно, что нелинейная часть (5)-(1) графика функции материала увеличивается на (5')-(1') и прибавляется к предыдущему участку для достижения нижнего предела отрицательной части функции – точка (1') (конечный участок кривой графика = зеленый линия на рисунке 3.36).

При действии многократной (циклической) нагрузки на материал типа *PKIN* при обычном случае кинематического упрочнения с учетом увеличивающегося коэффициента нагрузки системой выводится следующая кривая зависимости усилия-деформации – рисунок 3.34.

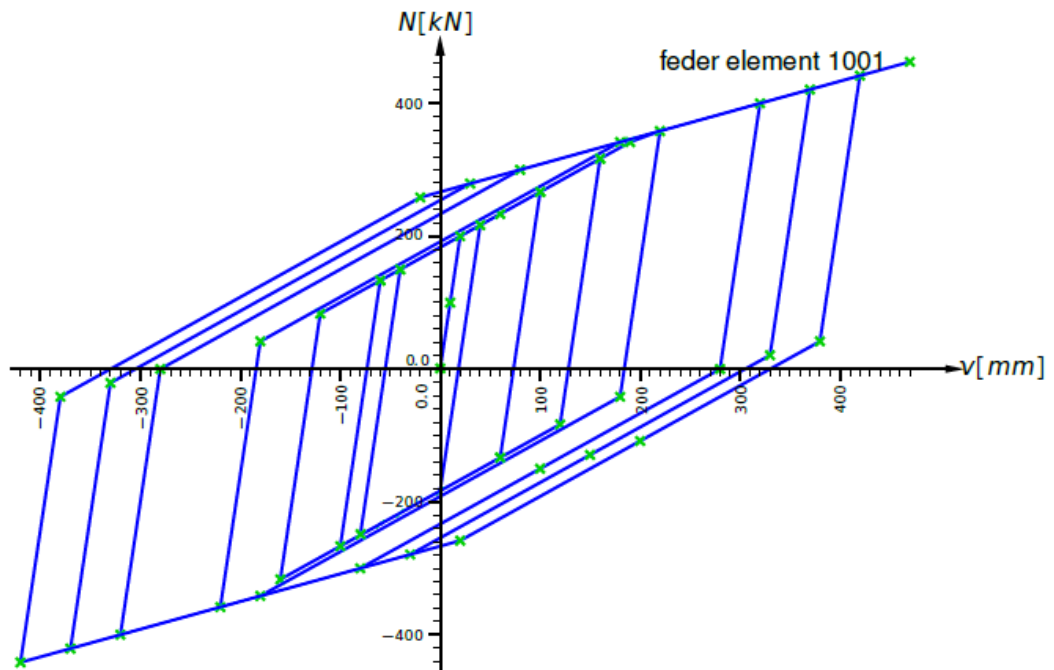


Рис. 3.34 – Кинематическое упрочнение материала при его циклическом нагружении: *feder element* (немец. яз.) – пружинный элемент

На рисунке 3.35 показано кинематическое упрочнение для нелинейного материала (изогнутая кривая функции) без учета упругих деформаций ($f_y = 0$).

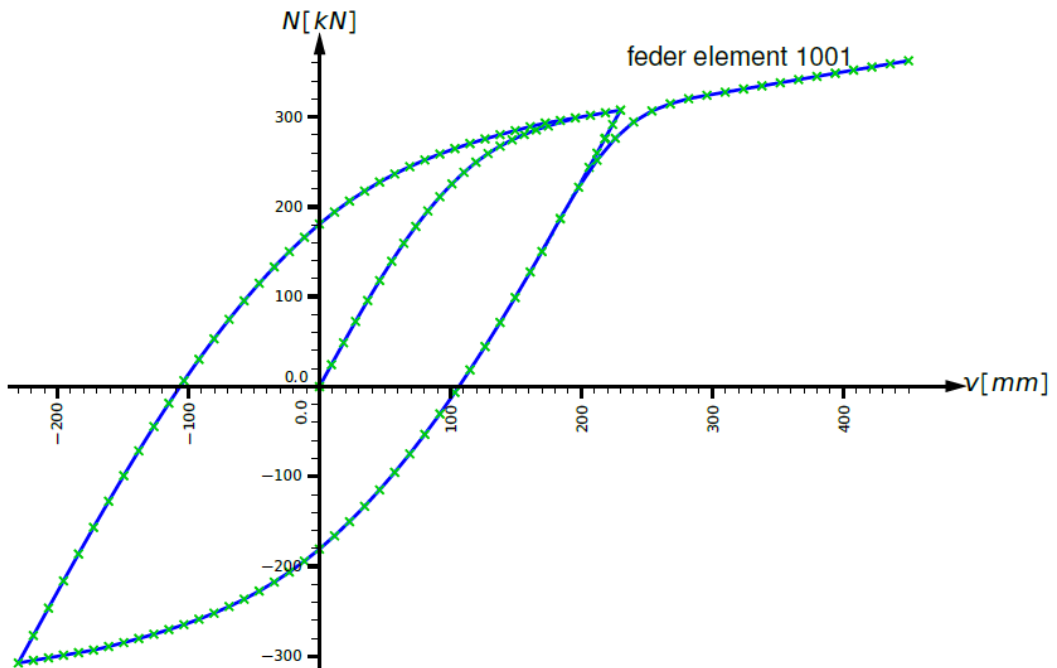


Рис. 3.35 – Кинематическое упрочнение для нелинейного материала

На рисунке 3.36 продемонстрирован случай увеличения нелинейного участка кривой графика функции ($f_y = 60$). В данной функции учтена линейная (упругая) составляющая материала. При первой разгрузке достигается новая нулевая точка функции (красный круг на графике). Если в эту точку будет введена исходная функция работы материала, то в системе никогда не будет достигнут нижний предел текучести (два верхних рисунка – рис. 3.36). Поэтому нелинейная часть функции материала увеличивается, чтобы была возможность пересечь границу нижнего предела текучести (самый нижний (последний) рисунок – рис. 3.36).

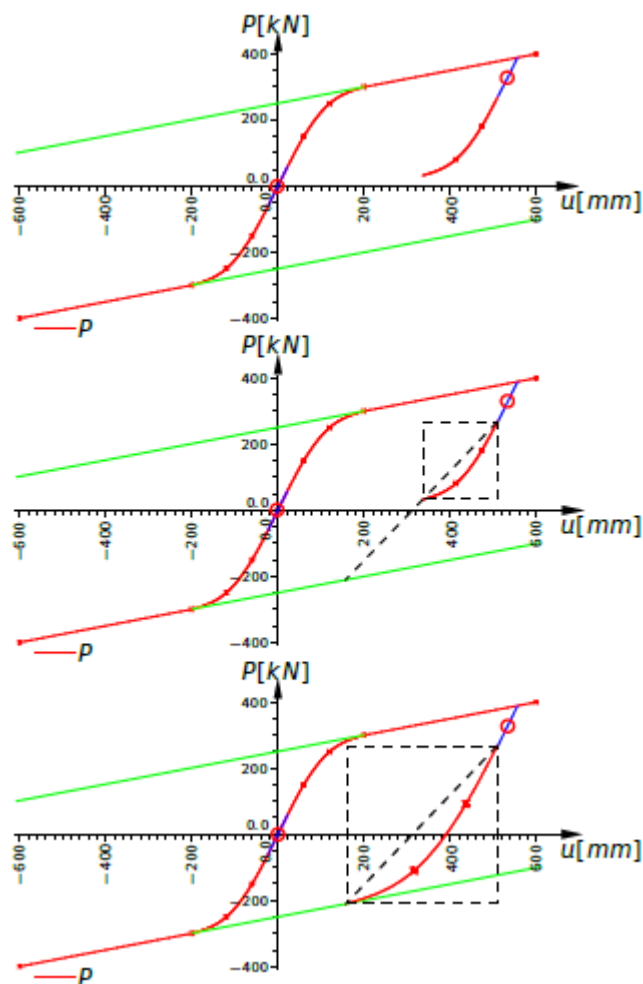


Рис. 3.36 – Увеличение нелинейного участка функции работы материала

***HYPE* Сверхупругий материал**

Для данного материала характерна нелинейно-упругая работа без пластических деформаций. При изменении знака нагружения данный тип материала реагирует таким же образом, как это показано на рисунке 3.33 кривая (7).

***GAP* Зазор/разрыв**

Ввод необязательного разрыва в график выполняется независимо от функции, по которой данный график был построен. Используя данную возможность, при помощи параметра *GAP* пользователь может вводить в расчетную систему соответствующие свойства для пружинных элементов (например, через команду *SOFIMSHA: SPRI*).

Ввод подобного зазора одинаково эффективен как в процессе анализа действия растягивающих, так и сжимающих усилий. Величина зазора не зависит от возможного значения пластической деформации, оно остается постоянным (см. рис. 3.37).

Для материала типа *MTYP PKIN* данная функция не поддерживается.

Файл с примером использования данной функции:
ase.dat/english/spring/spring_law_1_plas_gap.dat.

***CRAC* Трещины**

Необязательный для использования параметр прочности материала на растяжение может быть учтен в расчетной системе независимо от основной функции работы материала за счет ввода в систему соответствующего параметра *CRAC* для пружинного элемента, например, команда *SOFIMSHA: SPRI*.

В отличие от задания конкретных пределов прочности материала на растяжение при помощи соответствующих функций, параметр *CRAC* позволяет:

- при достижении заданного значения прочности после образования трещин в материале значение передаваемого растягивающего усилия падает до нуля;
- воздействие постоянной нагрузки сопровождается соответствующим ростом трещины;
- при изменении знака нагружения направление раскрытия трещины также должно быть изменено до момента, как направление действия сжимающего усилия снова можно будет вернуть в изначальное положение.

Для материала типа *MTYP PKIN* данная функция не поддерживается.

Файл с примером использования данной функции:

ase.dat/english/spring/spring_law_1_plas_crac.dat.

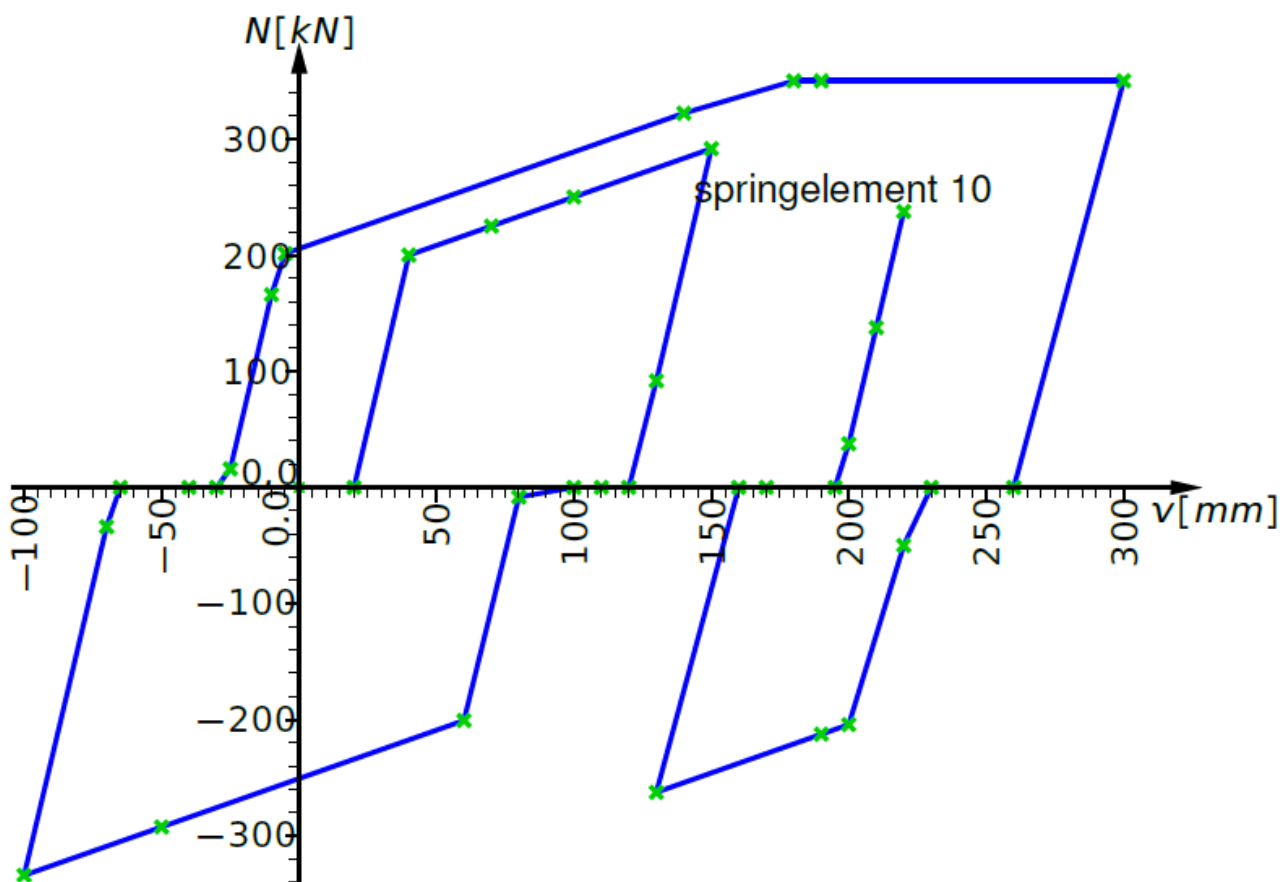


Рис. 3.37 – Реакция пружинного элемента с учетом разрыва *GAP*

3.25 SFLA – Зависимость усилий и перемещений/деформаций

См. также: [SMAT](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Взамен устаревшего → <i>SMAT NO</i>	-	*
<i>U</i>	Перемещения/деформации [<i>mm</i>] или угол поворота [<i>mrاد</i>]	*	!
<i>F</i>	Усилие [<i>kN</i>] или момент [<i>kNm</i>], или обозначение расчетной характеристики ⁸	<i>LIT4</i>	-
<i>S</i>	Тип опорной точки ... <i>POL</i> Полигональная точка, острый изгиб <i>SPL C²</i> – сплошная точка (кубический сплайн) ... или жесткость [<i>kN/m, kNm/rad</i>], уклон	*	<i>POL</i>
<i>SH</i>	Модуль упрочнения [<i>kN/m</i>], [<i>kNm/rad</i>]	*	-
<i>FP</i>	Предел упругости/пропорциональности [<i>kN</i>], [<i>kNm</i>] ⁸	*	-
<i>TYPE</i>	Тип реакции, классифицированный по типу соединительного элемента	<i>LIT</i>	-
<i>LEV</i>	Эталонное значение нормального/осевого усилия	[%], [-]	-
<i>TITL</i>	Взамен устаревшего → <i>SMAT TITL</i>	<i>LIT32</i>	-

⁸ В случае, когда соответствующие прочностные характеристики соединительного элемента введены в систему при помощи команды *SMAT*, рекомендуется значения для параметра *F* вводить в [%] или в [-] (см. таблицу выше). При этом все значения < 0.0 характеризуются как значения *MIN*, а значение > 0.0, соответственно, как *MAX* – прочностная характеристика, относящаяся к определенному типу реакции/усилия, возникающей в материале при его нагружении.

Общие сведения

При помощи команды *SFLA* в расчетной системе определенному типу реакции/усилия, возникающего в материале пружинного элемента при его нагружении, можно присвоить отдельную функцию работы (\rightarrow *SMAT*). Данная функция характеризует поведение материала при действии на него одноосной монотонной нагрузки. Поведение материала в условиях разгрузки и повторного нагружения зависит от типа материала (\rightarrow *SMAT* *MTYP*).

Анализируемый участок материала включает до 20 точек (см. таблицу выше) с сегментами, в каждый из которых имеет свое значение U и F . Ввод точек в систему осуществляется таким образом, чтобы значения параметров U располагались в порядке возрастания.

Примечание

Частичные коэффициенты запаса по материалу не рассматриваются системой по отдельности; они должны быть учтены в заданной функции.

Примечание

При возникновении деформаций, значения которых выходят за пределы заданного диапазона, в качестве продолжения кривой на графике, предполагается использование линейной функции, кривая которой ограничивала бы дальнейший рост деформаций в определенной точке (линейное возмущение). Это также касается участков на графике, которые описывают поведение материала при действии на него как растягивающих, так и сжимающих усилий; однако, на участках перехода из растяжения в сжатие и наоборот данная функция не распространяется.

TYPE Тип реакции/усилия

В зависимости от типа соединительного элемента (\rightarrow *SMAT LTYP*) доступны следующие типы реакций *TYPE*⁹:

STD (Стандартная пружина):

<i>P</i>	Нормальное (осевое) усилие в пружинном элементе
<i>PT</i>	Поперечное (сдвигающее) усилие в пружинном элементе
<i>M</i>	Момент в пружинном элементе

Для соединительных элементов типов *IHNG* (неявный шарнир) или *PMM* доступны следующие типы реакций:

<i>N</i>	Нормальное (осевое) усилие
<i>VY</i>	Сдвиговое усилие V_y
<i>VZ</i>	Сдвиговое усилие V_z
<i>MT</i>	Момент кручения M_t
<i>MY</i>	Изгибающий момент M_y
<i>MZ</i>	Изгибающий момент M_z

LEV Эталонное значение

Выведение функции зависимости нормального (осевого) усилия *P* и реакции *R* (соотношение *P-R*) стало возможным благодаря заданию в системе целого семейства функций. Поэтому каждое семейство кривых функций характеризуются конкретным эталонным значением (уровнем) осевого усилия *LEV*¹⁰. Эталонное значение зависит прочностных характеристик соединительного элемента – *SMAT P+/P-* (вводятся в [%] или в качестве коэффициентов [-]).

⁹ Тип реакции *TYPE* должен быть указан при вводе первой точки на линии. Данный тип сохраняется для последующих точек до момента, пока он не изменится. В то же время изменение типа реакции соответствует тому, в систему введена новая функция работы материала или введено целое семейство таких функций (см. описание *LEV*).

¹⁰ Значение параметра *LEV* должно быть определено при вводе первой точки каждого семейства кривых функций. Данное значение сохраняется для последующих точек до момента, пока оно не изменится. Это изменение соответствует тому, что в систему было введено новое семейство функций. Изменение типа реакции *TYPE* характеризует завершение действия семейства функций для предыдущего типа *TYPE*.

Примечание

Ввод/задание семейства функций должно осуществляться с учетом монотонно возрастающего эталонного значения параметра LEV .

На рисунках 3.38 и 3.39 показаны, например, графики семейства функций для изгибающего момента M_y и результирующий график зависимости P - M_y .

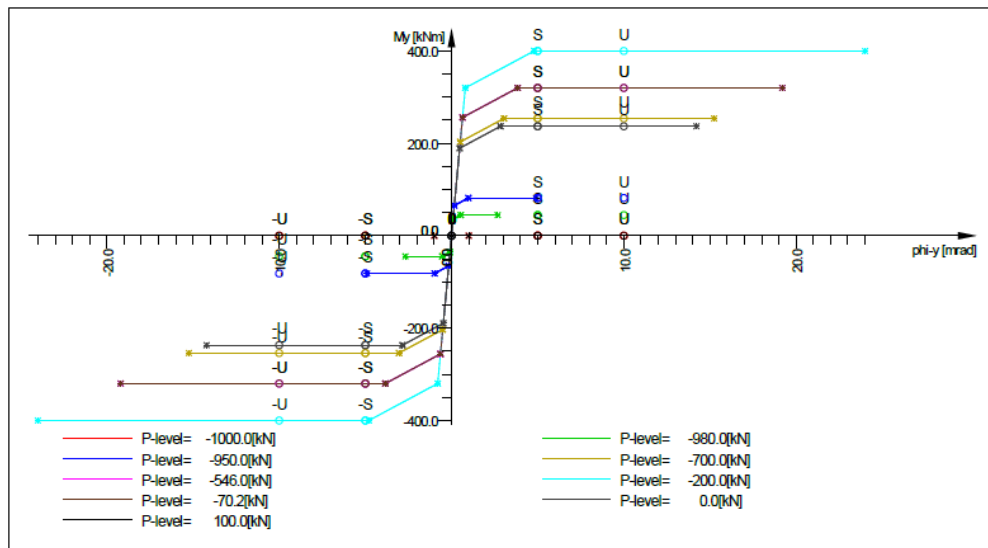


Рис. 3.38 – Графики семейства функций зависимости P - M_y

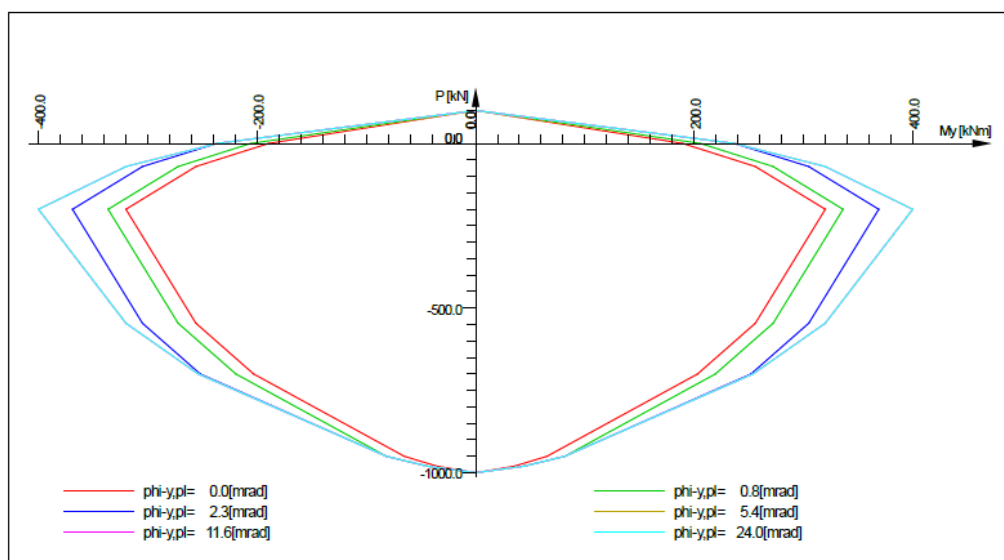


Рис. 3.39 – Результирующий график зависимости P - M_y

Особые функции

Для некоторых общих функций имеется возможность их особого использования отдельной командной строкой:

- Шарнир: все значения равны нулю.
- Функция линейно-упругого материала: вводится только параметр S .
- Билинейная функция (идеально упругий пластик): вводятся только S и F .
- Трилинейная функция: вводятся S , FP (предел пропорциональности), SH (модуль упрочнения) и F (предел пластичности).
- Функция предела пластичности (граница прочностной характеристики): вводится только F .

Предельные значения прочностных характеристик

Чтобы классифицировать и упростить оценку реакции, возникающей в соединительном элементе, функция, описывающая деформации вдоль оси, необязательно должна быть разделена на условные составляющие, также известные как «*Пределы Интервалов*». Разделение на составляющие происходит исходя из «*Предельных значений прочностных характеристик*», которые и характеризуют границы рассматриваемых интервалов.

Ввод границ интервалов для прочностных характеристик регулируется программой автоматически путем ввода соответствующих пар значений параметров U и F , что позволяет в конечном итоге получить истинную функцию работы материала:

- U – нормативное значение деформации, F – свободный идентификатор до 4 букв. Пример: « S » обозначает предельное значение деформации.
- Ввод нормативных значений должен быть выполнен таким образом, чтобы значения параметров U располагались в порядке возрастания.
- Предел $U = 0$ должен быть введен в систему.

Пример ввода, представленный ниже, соответствует 5-ти пределам для ранее введенной функции прочностной характеристики M_y^{II} (см. рисунок 3.38).

!Link material (материал соединительного элемента):

SMAT NO 112 LTYP IHNG P++ 100 P+- -1000 MY++ 400 TITL "Шарнир пластичности"

...

!Family of curves for reaction M_y (семейство функций для усилия M_y):

...

!Curve for P-level (график функции P-предельное значение) $0.2*(P-) = -200\text{kN}$:

SFLA S 400000 SH 20000 FP 0.8[-] F 1.0[-] LEV -0.2[-] TYPE MY

!Corresponding performance limits (соответствующее предельное значение):

SFLA U -10.0 "-U"

SFLA U -5.0 "-S"

SFLA U 0.0 "0"

SFLA U 5.0 "S"

SFLA U 10.0 "U"

...

Таким образом, в зависимости от фактической деформации u [$mrad$] возможны следующие варианты ввода границ для прочностных характеристик:

$< U^-$	$u < -10.0$
(U^-, S^-)	$-10.0 < u < -5.0$
$(S^-, 0)$	$-5.0 < u < 0.0$
$(0, S)$	$0.0 < u < 5.0$
(S, U)	$5.0 < u < 10.0$
$> U$	$u > 10.0$

И в качестве дополнения, еще несколько особых способов ввода:

U^-	$u = -10.0$
S^-	$u = -5.0$
0	$u = 0.0$
S	$u = 5.0$
U	$u = 10.0$

¹¹ Значения параметров FP и F трилинейной функции материала определяются исходя из (80% и 100% соответственно) прочностной характеристики момента $MY+$, введенной в систему в составе команды $SMAT$.

В качестве дополнения, в случае использования семейства функций следует отметить:

- В большинстве случаев для каждой функции семейства есть возможность ввода соответствующих пределов.
- В пределах одного семейства функций необходимо обеспечить согласованность всех заданных пределов, т. е.:
 - Количество пределов при $U < 0.0$ должно быть одинаковым для всех функций семейства.
 - Количество пределов при $U > 0.0$ должно быть одинаковым для всех функций семейства.
 - Идентификаторы пределов (индексы) должны быть одинаковы для всех функций определенного семейства (первый введенный предел функции и определяет индекс для всего семейства функций).
- Пределы функций, введенные в расчетную систему для определенного семейства функций, автоматически присваиваются каждой функции данного семейства (с более низким эталонным/нормативным значением для осевого/нормального усилия), до тех пор, пока в системе не будет достигнуто следующее эталонное значение нормального усилия, исходя из установленных пределов прочностных характеристик¹².

¹² Например, чтобы создать в расчетной системе набор пределов для прочностных характеристик, которые были бы учтены каждой функцией семейства, потребуется лишь ввести данные пределы в конце командной строки, характеризующей то или иное семейство функций.

3.26 SVAL – Характеристики поперечного сечения

См. также: *SREC, SCIT, TUBE, CABL, SECT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер поперечного сечения	-	1
<i>MNO</i>	Номер материала или тип балочного элемента: <i>CENT</i> ориентированная по центру балка <i>BEAM</i> балка с эксцентриситетом (опорная ось/ось привязки) <i>TRUS</i> только ферма (без изгиба) <i>CABL</i> только кабель/нить	-/ <i>LIT</i>	1
<i>A</i>	Площадь сечения	$[M^2]_{1012}$	1.0
<i>AY</i>	Площадь сдвига по <i>y</i>	$[M^2]_{1012}$	-
<i>AZ</i>	Площадь сдвига по <i>z</i>	$[M^2]_{1012}$	-
<i>IT</i>	Момент инерции относительно оси кручения	$[M^4]_{1014}$	*
<i>IY</i>	Момент инерции относительно <i>y</i>	$[M^4]_{1014}$	$A^3/12$
<i>IZ</i>	Момент инерции относительно <i>z</i>	$[M^4]_{1014}$	<i>IY</i>
<i>IYZ</i>	Момент инерции относительно <i>yz</i>	$[M^4]_{1014}$	0
<i>CM</i>	Модуль деформации	$[M^6]_{1016}$	0
<i>YSC</i>	Координаты центра сдвига относительно	$[MM]_{1011}$	0
<i>ZSC</i>	центра тяжести сечения	$[MM]_{1011}$	0
<i>YMIN</i>	Ордината левого края плоскости сечения	$[MM]_{1011}$	*
<i>YMAX</i>	Ордината правого края --/--	$[MM]_{1011}$	*
<i>ZMIN</i>	Ордината верхнего края --/--	$[MM]_{1011}$	*
<i>ZMAX</i>	Ордината нижнего края --/--	$[MM]_{1011}$	*
<i>WT</i>	Сдвиговые напряжения при $Mt = 1.0$	$[1/M^3]_{1018}$	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>WVY</i>	Сдвиговые напряжения при $V_y = 1.0$	$[1/м^2]_{1017}$	*
<i>WVZ</i>	Сдвиговые напряжения при $V_z = 1.0$	$[1/м^2]_{1017}$	*
<i>TITL</i>	Обозначение поперечного сечения	<i>Lit24</i>	-

Данная команда позволяет вводить в расчетную систему сечения без соответствующих геометрических характеристик, которые, конечно же, необходимы для детального анализа возникающих напряжений, определения зон текучести материала или габаритов железобетонного элемента. Таким образом, данная команда используется только при статическом анализе расчетной системы.

При помощи параметров *NO* и *MNO* определенное сечение в автоматическом режиме может быть закреплено за конкретным типом элемента расчетной системы. Данная программная возможность может быть использована в любой момент времени абсолютно для любого заданного сечения. Однако в таком случае все остальные вводные параметры данной команды будут проигнорированы программой.

Если значение параметра *IT* равно нулю, необходимо должное внимание уделить тому, чтобы в процессе создания всей статической системы крутильная степень свободы не стала причиной возникновения неконтролируемого вращения (появление сообщения об ошибке: элементы расчетной системы свободно перемещаются в поле модели).

Значение *IY*, установленное в программе по умолчанию, эквивалентно прямоугольному сечению шириной 1 м с заданной площадью *A*.

В соответствии с принципом Сен-Венана значение момента инерции относительно оси кручения, установленного в программе по умолчанию, определяется по следующей формуле:

$$I_T = \frac{A^4}{4 \cdot \pi^2 \cdot (I_y + I_z)} \quad (3.142)$$

Это значение точно характеризует круглые и эллиптические сечения.

Погрешности, возникающие при расчете прямоугольных сечений, представлены в следующей таблице:

a/b	1/1	2/1	10/1
Требуемое значение	0.140	0.458	3.130
Расчетное/приближенное значение	0.152	0.486	3.010

Значения параметров от $YMIN$ до $ZMAX$, установленные в программе по умолчанию, используются для построения первого варианта прямоугольного сечения, что в конечном итоге позволяет оптимизировать сечение и внести необходимые поправки исходя из значения радиуса вращения.

Команда $SVAL$ также может использоваться для ввода различных изменений/модификаций в состав поперечного сечения. Данные изменения в уже созданное сечение могут быть внесены при помощи отрицательного значения параметра NO , либо путем создания дополнительной копии существующего сечения при помощи отрицательного значения параметра MNO . В дальнейшем при необходимости значение площади A с учетом значения параметра CM может быть введено в систему в виде коэффициента (единицы измерения [-], [0/0] или [0/00]). Именно поэтому, исходя из данной возможности, в программе уже установлено значение, равное 1.0 [-] (см. таблицу выше). Новое поперечное сечение больше не обладает никакими геометрическими свойствами.

Пример ввода на программном языке $CADINP$ представлен ниже:

```

PROF 1 NEB 300
PROF 2 NEB 300
SVAL -1 IT 0.5[-]
SVAL 3 -2 IT 0.5[-] IZ 9000[cm4]
SECT 4
SV IT 0.5[-]
PROF 1 NEB 300

```


Поперечное сечение 1 воспринимает 50% от действия момента инерции, возникающего вокруг оси кручения. Геометрические свойства поперечного сечения аннулируются. Поперечное сечение 3 воспринимает 50% от значения момента инерции, возникающего вокруг оси кручения поперечного сечения 2, и увеличенное значение момента инерции I_z , но без учета геометрических свойств. Поперечное сечение 2 не модифицировано. Поперечное сечение 4 характеризуется уменьшенным в половину значением момента инерции IT и полным набором геометрических характеристик (необходима лицензия *AQUA*).

3.27 SREC – Прямоугольное сечение, тавровая балка, плита

См. также: *SVAL, SCIT, TUBE, CABL, SECT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер поперечного сечения	-	1
<i>H</i>	Габаритная высота	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>B</i>	Ширина прямоугольного сечения, тавровой балки (верхняя часть)	[мм] ₁₀₁₁	100
<i>HO</i>	Ширина плиты (верхняя часть)	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>BO</i>	Ширина плиты (нижняя часть)	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>SO</i>	Смещение положения арматуры –	[мм] ₁₀₂₄	<i>H/10</i>
<i>SU</i>	Смещение положения арматуры +	[мм] ₁₀₂₄	<i>SO</i>
<i>SS</i>	Смещение боковой арматуры	[мм] ₁₀₂₄	<i>SO</i>
<i>MNO</i>	Номер материала	-	*
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	*
<i>MRFL</i>	Материал соединительной арматуры	-	*
<i>RTYP</i>	Дополнительные арматурные элементы: <i>CORN</i> Одиночная соединительная арматура в углах элемента <i>CU</i> Арматура, укладываемая по периметру элемента <i>SYM</i> Симметрично расположенная арматура <i>ASYM</i> Асимметрично расположенная арматура (дополнительные параметры рассмотрены ниже в тексте)	<i>LIT</i>	*
<i>ASO</i>	Площадь минимального защитного слоя –	[см ²] ₁₀₂₀	0
<i>ASU</i>	Площадь минимального защитного слоя +	[см ²] ₁₀₂₀	0

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>DASO</i>	Диаметр верхней арматуры	[мм] ₁₀₂₃	*
<i>DASU</i>	Диаметр нижней арматуры	[мм] ₁₀₂₃	DASO
<i>DASS</i>	Диаметр боковой арматуры	[мм] ₁₀₂₃	DASO
<i>A</i>	Расстояние между прутами арматуры	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>AMIN</i>	Минимальное расстояние между прутами	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>AMAX</i>	Максимальное расстояние между прутами	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>ASL</i>	Площадь поперечной соединительной арматуры	[см ² /м] ₁₀₂₁	*
<i>INCL</i>	Угол наклона поперечных соединений	ctg∟ град.	*
<i>REF</i>	Расположение начала локальной системы координат <i>C</i> Центр тяжести <i>Y+/Y-/M</i> По отношению к балке справа/слева/посредине <i>Y+Z-/Y-Z-/Z-</i> По отношению к верхней части балки справа/слева/посредине <i>Y+Z-/Y-Z+/Z+</i> По отношению к нижней части балки справа/слева/посредине <i>Y+P/Y-P/PM</i> По отношению к балке в плите справа/слева/посредине <i>SC</i> Центр сдвига	<i>LIT</i>	<i>C</i>
<i>YM</i>	Явное смещение относительно середины	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>ZM</i>	Явное смещение относительно середины	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>IT</i>	Момент инерции относительно оси кручения	-/м ⁴	*
<i>AY</i>	Площадь деформации сдвига по <i>VY</i>	-/м ²	0.

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>AZ</i>	Площадь деформации сдвига по <i>VZ</i>	-/м ²	0.
<i>BCYZ</i>	Селектор кривой функции изгиба	LIT	*
<i>SPT</i>	Количество концентраторов напряжений (0/ 2/ 4/ 6) с учетом расчета на сдвиг боковой части элемента (1/ 3/ 5/ 7)	LIT	0
<i>INTE</i>	Граница раздела/контакта между стенкой и плитой балки (тавра, двутавра): <i>INDE</i> Шпунтовое соединение внахлестку (зубчатая поверхность) <i>ROUG</i> Шероховатая поверхность (соединение внахлестку) <i>EVEN</i> Ровная поверхность (соединение внахлестку) <i>SMOO</i> Гладкая (очень ровная) поверхность (соединение внахлестку)	LIT	-
<i>CINT</i>	Коэффициент шероховатости/неровности поверхности	-	*
<i>MUE</i>	Коэффициент трения поверхности	-	*
<i>BEFF</i>	Ширина эквивалентного полого сечения	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>TITL</i>	Обозначение поперечного сечения	<i>Lit32</i>	-

В зависимости от введенных параметров генерируется один из следующих типов сечений:

<i>H</i>	Плита с предполагаемой шириной 1 м или шириной <i>BO</i>
<i>H, B</i>	Прямоугольное поперечное сечение
<i>H...BO</i>	Тавровая балка <i>T-beam</i>

Когда для параметра *REF* не вводится никаких значений, предполагается, что начало локальной системы координат поперечного сечения совпадает с его центром тяжести. Это характерно для балок с осью отсчета/осью привязки. Необходимые размеры поперечного сечения могут быть вычислены в модуле *AQB*. Для этой задачи параметры *B* или *H* могут быть введены с отрицательным знаком, что позволяет внести соответствующие изменения, касающиеся только этих величин – получение сечения с необходимыми габаритами.

Распределение арматуры контролируется параметром *RTYP*, диаметр арматуры *DASO/U*, промежуточные расстояния между прутами арматуры *A*, а максимальные и минимальные расстояния между ними подбираются, исходя из выбранной нормативной документации, и хранятся в *INI*-файле. Общее число арматурных прутьев определяется исходя из значений параметров *ASO* и *ASU*.

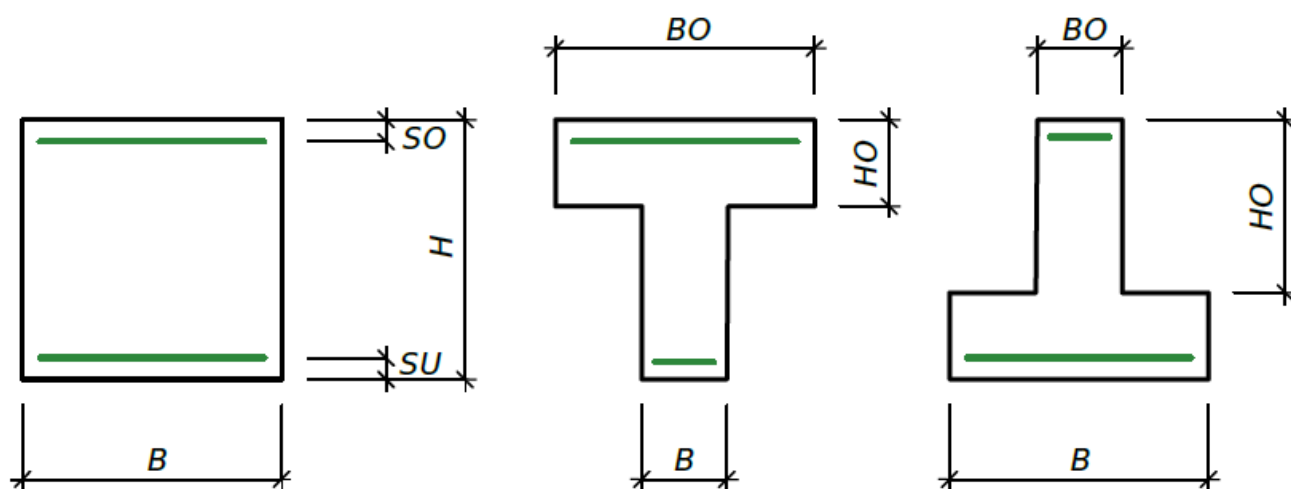


Рис. 3.40 – Используемые габариты поперечного сечения

Колонны:

- | | |
|------------|---|
| <i>CU</i> | Защитный слой <i>ASO</i> учитывается как 0 слой по всему периметру колонны (по окружности), исходя из шага стержней |
| <i>SYM</i> | Защитный слой <i>ASO</i> учитывается как 0 слой для каждой верхней и нижней части колонны, однако, если значение |

слоя больше максимального расстояния между стержнями C (300 мм), будут добавлены промежуточные стержни вместе с слоем 3

SZM Защитный слой ASO учитывается как 0 слой для каждой правой и левой части колонны, однако, если значение слоя больше максимального расстояния между стержнями C (300 мм), будут добавлены промежуточные стержни вместе с слоем 3

CORN Защитный слой ASO учитывается как 0 слой, сосредоточенный в углах колонны, промежуточные арматурные стержни выбираются в соответствии с выбранными нормами проектирования

CORN:n Как арматура $CORN$, но количество стержней кратно n ($1 \leq n \leq 7$)

CORN:nZ Как арматура $CORN:n$, но с учетом расположения слева или справа относительно оси Z

CORN:nB Как арматура $CORN:n$, но рассматриваются только арматурные пучки (стержни с большим эквивалентным диаметром $D \cdot \sqrt{n}$)

Во всех случаях система будет рассчитываться с учетом наименее допустимого значения диаметра арматуры, определяемого исходя из выбранных норм проектирования - *INI*-файл (минимальный диаметр $C = 12$ мм), и с учетом минимального процента армирования, устанавливаемого в соответствии с количеством стержней (всего минимум 4) и их минимальным диаметром.

Так как в расчетной системе армирование представляется в виде отдельных стержней, в программе будут установлены максимально допустимые расстояния $AMAX$ между ними. Данные расстояния, как и в предыдущих случаях, устанавливаются в соответствии с выбранными нормами проектирования (для колонн, изгибаемые элементы и скрученные элементы). Арматурные стержни в углах элемента располагаются с минимальным расстоянием $AMIN$ вдоль слоя

площадью A . Если расстояние $AMAX$ не достаточно большое, промежуточные арматурные стержни будут введены в состав элемента исходя из этого максимального расстояния.

Балки:

ASYM Два защитных слоя *ASU* в нижней (слой 1) и *ASO* в верхней (слой 2) части балки. Дополнительные промежуточные арматурные стержни расположены в слое 3 в боковых частях

ASZM Аналогично *ASYM*, но защитный слой правой стороны балки расположен в слое 1, а левой стороны в слое 2.

Если расстояние между стержнями C в армированных слоях 1 и 2 становится больше максимального расстояния T (350 мм), то в боковой части стенки будет добавлена дополнительная арматура слоем 3. Несмотря на то, что данная процедура является обязательной в процессе анализа действия кручения, пользователь может деактивировать данную функцию путем ввода нулевого значения для параметра IT или увеличить значение для параметра $AMAX$, но в таком случае полученные сечения больше не будут воспринимать кручение. Характеристики слоя 3 будут закреплены за ним при условии, если к параметру $RTYP$ не добавлять “: F ”, что впоследствии позволит увеличить данный параметр при расчете элемента на двухосный изгиб.

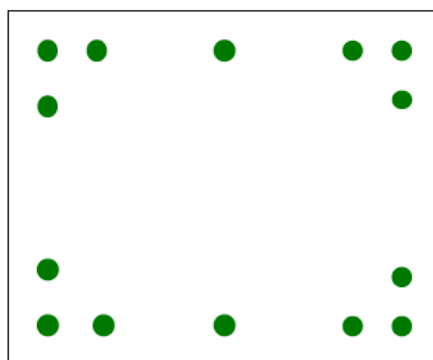


Рис. 3.41 – Армирование одиночными арматурными стержнями

Защитный слой арматуры в боковой части элемента устанавливается исходя из минимальной толщины защитного слоя верхней или нижней части, но не более одной четвертой от ширины поперечного сечения. Значение защитного слоя может быть изменено с помощью параметра *SS*.

Обратите внимание, что в соответствии с документом *DIN 1045-1* защитный слой сжатой арматуры (эффективное расстояние между стержнями – $D/2$) является предельным значением для плеча силы при расчете сечения с трещинами на действие сдвига. Подытожив все вышеизложенное, диаметр арматурного стержня всегда оказывает большое влияние при расчете конструктивного элемента на сдвиг.

При расчете поперечной соединительной арматуры для параметра *ASL* может быть задано минимальное значение. По умолчанию для элементов с симметричным армированием (сжатые участки) значение данного параметра равно нулю, в других случаях значение устанавливается исходя из выбранной нормативной документации. В случаях, когда при решении некоторых задач, связанных с проектированием сооружений, необходимо различать минимальное и существующее/подобранное армирование, при создании расчетной системы в ПК *SOFiSTiK* необходимо указывать только минимальное армирование. Данный параметр может быть введен в систему в следующих единицах измерения: $[\text{см}^2/\text{м}]_{1021}$; $[\text{см}^2/\text{м}^2]_{1022}$, в виде коэффициента [-].

Параметр $MRF = 0$ вводится для неармированных бетонных сечений. Для металлических и деревянных поперечных сечений использование параметров *MRF* или *MRFL* не допускается.

Инерция кручения и упругое напряженное состояние, возникающее в элементе при кручении, всегда рассчитываются исходя из распределения крутящего момента в стенке балки с учетом его максимальной высоты и уменьшенной ширины плиты. Чтобы ликвидировать вращение в бетонных конструкциях, эффективный момент инерции относительно оси закручивания может быть уменьшен с помощью параметра *IT*, который может быть введен в явном виде или в [%] до какого-то относительного значения. Значение 0.0 для

параметра IT допускается, однако, это может привести к образованию кинематических систем (несходимости).

При расчете эквивалентного полого сечения балки, укрепленного арматурой воспринимающей действие крутящего момента, учитывается только его стенка. Если параметр SPT вводится в систему со значением +8, а армирование в плите расположено с внешней стороны третьего слоя, в то время, как второй слой примыкает с внутренней стороны третьего слоя, то в таком случае действие кручения распределяется по стенке и полкам балки (тавра, двутавра).

По умолчанию площади деформаций сдвига всегда рассчитываются независимо от типа материала, однако, они в обязательном порядке учитываются при анализе балочного элемента по методу Тимошенко. Чтобы избежать дополнительных расчетов, пользователь может самостоятельно ввести значения соответствующих площадей при помощи параметров AU и AZ (ввод осуществляется в $[m^2]$ или в $[\%]$). При вводе значения 0.0 площадь деформаций сдвига впоследствии никак не будет влиять на результат анализа балочного элемента.

Расчет влияния поперечного сдвига осуществляется при наиболее неблагоприятном положении действующего усилия для конструктивного элемента (нейтральная ось или в месте соединения с пластиной). Ввод в систему параметра $SPTS$ 3 задействует одну из полок балочного элемента, $SPTS$ 5 или 7 задействует обе полки балки.

Если граница раздела $INTE$ будет определена в расчетной системе, ее расчет будет выполняться всегда в автоматическом режиме.

3.28 SCIT – Круглые и кольцевидные (трубы) сечения

См. также: *SVAL*, *SREC*, *TUBE*, *CABL*, *SECT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер поперечного сечения	-	1
<i>D</i>	Внешний диаметр	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>T</i>	Толщина кромки (0.0 = сплошное сечение)	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>SA</i>	Смещение внешней арматуры	[мм] ₁₀₂₄	<i>T/10</i>
<i>SI</i>	Смещение внутренней арматуры	[мм] ₁₀₂₄	<i>SA</i>
<i>MNO</i>	Номер материала сечения	-	*
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	*
<i>MRFL</i>	Номер материала поперечной арматуры	-	<i>MRF</i>
<i>RTYP</i>	Дополнительные армированные элементы: <i>COLU</i> Колонны <i>HOOP</i> Колонна с хомутами <i>BEND</i> Изгибаемый элемент	<i>LIT</i>	<i>COLU</i>
<i>ASA</i>	Внешняя арматура	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>ASI</i>	Внутренняя арматура	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>DAS</i>	Диаметр арматуры	[мм] ₁₀₂₃	28
<i>A</i>	Максимальное расстояние между арматурными стержнями или количество промежутков [-] между ними	[мм] ₁₀₂₃	*
<i>ASL</i>	Площадь поперечной соединительной арматуры	[см ² /м] ₁₀₂₁	0
<i>IT</i>	Момент инерции относительно оси кручения	-/м ⁴	*
<i>AY</i>	Площадь деформации сдвига по <i>VY</i>	-/м ⁴	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>AZ</i>	Площадь деформации сдвига по <i>VZ</i>	-/м ²	*
<i>TITL</i>	Обозначение поперечного сечения	<i>Lit32</i>	*

Расстояние *SI* для кольцевидного сечения соответствует внутреннему диаметру, а для сплошного сечения внутреннему диаметру. Армирование сечения может быть введено в явных единицах [см²/м]. Для размещения арматурных стержней в плоскости сечения отведено, как минимум, четыре участка (точки). По умолчанию в расчетной системе используется 6 арматурных стержней, число которых контролируется параметром *A*. Если этот параметр введен в систему с отрицательным значением или в виде явного количества промежутков [-], то данное значение будет соответствовать определенному количеству арматурных стержней.

В изгибаемых элементах не используется продольная арматура минимального диаметра, а в колоннах не используется поперечная соединительная арматура минимального диаметра. При необходимости ввода в расчетную систему изгибаемого элемента с арматурой минимального диаметра, пользователь может воспользоваться параметром *A*, задав для него явное значение. Так как большинство нормативных документов никак не описывают круглые сечения, любая поперечная соединительная арматура минимального диаметра должна быть введена в расчетную систему пользователем собственноручно при помощи параметра *ASL* [см²/м]₁₀₂₁.

Команда *CTRL RFCS* в модуле *AQUA* также эффективна и для сечений типа *SCIT*.

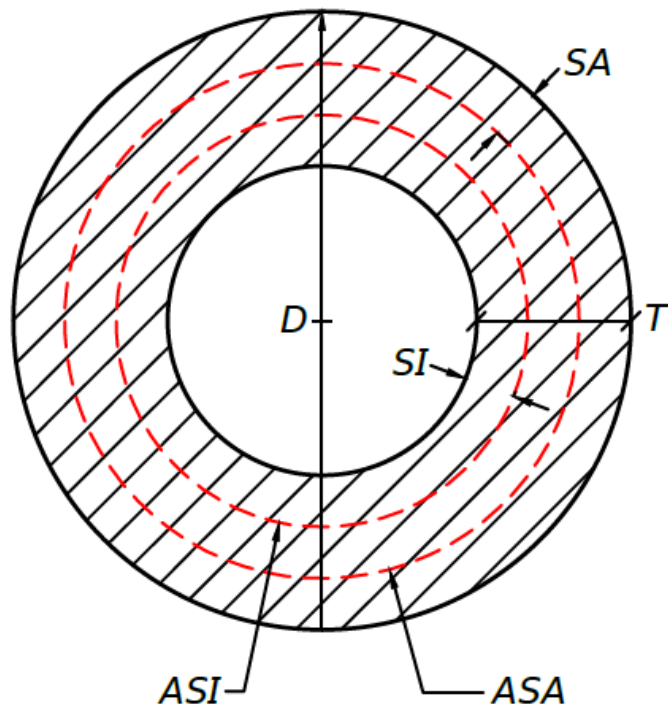


Рис. 3.42 – Круглое поперечное сечение

Параметры IT , $AУ$ и AZ вводятся в систему в виде абсолютных значений, либо в виде коэффициентов [%] для оптимизации теоретических значений.

3.29 TUBE - Круглые и кольцевидные сечения из металла

См. также: *SVAL*, *SREC*, *TUBE*, *CABL*, *SECT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер поперечного сечения	-	1
<i>D</i>	Внешний диаметр	[мм]	
<i>T</i>	Толщина стенок (0 = сплошное круговое)	[мм]	0
<i>MNO</i>	Номер материала поперечного сечения	-	1
<i>BC</i>	График деформаций продольного изгиба 0 (отсутствует) <i>a</i> (нагрев) <i>b</i> (охлаждение) <i>c</i> (сплошное сечение) <i>d</i> (особый случай) <i>e</i> (ранее <i>AISC</i> для особого случая)	<i>LIT</i>	<i>a/c</i>
<i>TITL</i>	Обозначение поперечного сечения	<i>Lit32</i>	*

Деформации сдвига при расчете сечений учитываются. Отклонения этих значений от нормативных вводятся в системе при помощи команд *SCIT* или *SECT/CIRC/SV*, а также *SVAL*.

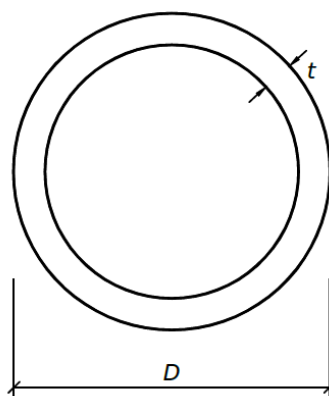


Рис. 3.43 – Кольцевидное поперечное сечение

3.30 CABL – Сечение кабеля/троса

См. также: *SVAL*, *SREC*, *SCIT*, *TUBE*, *SECT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер поперечного сечения	-	1
<i>D</i>	Внешний/расчетный диаметр	[мм]	-
<i>TYPE</i>	Тип сечения кабеля/троса (см. примечание)	<i>LIT</i>	-
<i>INL</i>	Тип сердечника кабеля/троса: <i>FE, FEN, FEC</i> Текстильный <i>SE, SES, SEL</i> Стальной	<i>LIT</i>	<i>FE</i>
<i>MNO</i>	Номер материала предварительно напряженной арматуры	-	1
<i>F</i>	Площадь составного участок сечения или коэффициент заполнения сечения, или площадь металлической части сечения	- мм ²	*
<i>K</i>	Разрушающее усилие или коэффициент крутки нити, или прочности на разрыв	- кН	*
<i>W</i>	Весовой коэффициент (кг/м/мм ²)·100 или вес	* кг/м	*
<i>KE</i>	Коэффициент потери (крепление конечных точек каната и т. д.)	-	1.0
<i>REF</i>	Учет значений коэффициентов <i>F/K/W</i> <i>DIN</i> в соответствии с <i>DIN 3051</i> <i>EN</i> в соответствии с <i>EN 12385-4</i>	<i>LIT</i>	*
<i>TITL</i>	Обозначение поперечного сечения	<i>Lit32</i>	*

Без определения типа кабеля/троса система будет воспринимать данный элемент как стальной стержень круглого сечения. В ПК *SOFiSTiK* доступны следующие типы кабелей:

<i>6x7</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 5</i>
<i>8x7</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 6</i>
<i>6x19</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 7</i>
<i>8x19</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 8</i>
<i>6x36</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 9</i>
<i>8x36</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 10</i>
<i>6x35N</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 11</i>
<i>6x19M</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 12</i>
<i>6x37M</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 13</i>
<i>17x7</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 14</i>
<i>18x7</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 14</i>
<i>34x7</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 15</i>
<i>35x7</i>	<i>EN 12385-4 Tab. 16</i>
<i>1x7</i>	<i>DIN</i> Скрученный кабель из 7 прядей
<i>1x19</i>	<i>DIN</i> Скрученный кабель из 19 прядей
<i>1x37</i>	<i>DIN</i> Скрученный кабель из 37 прядей
<i>1x61</i>	<i>DIN</i> Скрученный кабель из 61 прядей
	...
<i>1x547</i>	<i>DIN</i> Скрученный кабель из 547 прядей
<i>3052</i>	<i>DIN 3052</i> Скрученный кабель 1x7
<i>3053</i>	<i>DIN 3053</i> Скрученный кабель 1x19
<i>3054</i>	<i>DIN 3054</i> Скрученный кабель 1x37
<i>3055</i>	<i>DIN 3055</i> Стандартный кабель 6x7
<i>3056</i>	<i>DIN 3056</i> Стандартный кабель 8x7
<i>3057</i>	<i>DIN 3057</i> Прядь кабеля 6x19 тип <i>Filler</i>
<i>3058</i>	<i>DIN 3058</i> Прядь кабеля 6x19 тип «СИЛ»/ <i>Seale</i>

3059	<i>DIN 3059</i> Прядь кабеля 6x19 тип «ЛК-Р»/ <i>Warrington</i>
3060	<i>DIN 3060</i> Прядь кабеля 6x19
3061	<i>DIN 3061</i> Прядь кабеля 8x19 тип <i>Filler</i>
3062	<i>DIN 3062</i> Прядь кабеля 6x19 тип «СИЛ»/ <i>Seale</i>
3063	<i>DIN 3063</i> Прядь кабеля 8x19 тип «ЛК-Р»/ <i>Warrington</i>
3064	<i>DIN 3064</i> Прядь кабеля 6x36 тип <i>Warrington-Seale</i>
3065	<i>DIN 3065</i> Прядь кабеля 6x35 тип покрытия <i>Warrington</i>
3066	<i>DIN 3066</i> Прядь кабеля 6x37 тип <i>Warrington-Seale</i>
3067	<i>DIN 3067</i> Прядь кабеля 8x36 тип <i>Warrington-Seale</i>
3068	<i>DIN 3068</i> Прядь кабеля 6x24 стандартный тип
3069	<i>DIN 3069</i> Многожильный кабель 18x7
3070	<i>DIN 3070</i> Плоские пряди 10x10
3071	<i>DIN 3071</i> Плоские пряди 36x7
<i>VVS</i>	<i>PFEIFER</i> Витой канал для пропуска скрученной пряди (<i>DIN</i>)
<i>VVS-1</i>	<i>BTS</i> Витой канал для пропуска пряди крестовой свивки
<i>VVS-1P</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди параллельной свивки
<i>VVS-2</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди крестовой свивки
<i>VVS-2P</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди параллельной свивки
<i>VVS-3</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди крестовой свивки
<i>VVS-3P</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди параллельной свивки
<i>VVS-4</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди крестовой свивки
<i>VVS-4P</i>	<i>BTS</i> --/-- для пропуска пряди параллельной свивки
<i>PE-nnn</i>	<i>PFEIFER</i> Кабели/тросы от <i>PE-3</i> до <i>PE-100</i> (<i>Y 1450C</i>)
<i>PG-nnn</i>	<i>PFEIFER</i> Кабели/тросы от <i>PG-5</i> до <i>PG-125</i> (<i>Y 1770C</i> с <i>ES 160000</i>)
<i>PV-nnn</i>	<i>PFEIFER</i> Кабели/тросы от <i>PV-40</i> до <i>PV-2000</i> (<i>Y 1570C</i> с <i>ES 160000</i>)

ПРИМЕЧАНИЕ: *PFEIFER* (www.pfeifer.info) является крупным производителем канатов, тросов или вантов, а также всего необходимого оборудования по их устройству. Обозначения *PE*, *PG* и *PV* используются для маркировки канатов, производимые данной компанией.

Предел прочности кабеля на разрыв характеризуется соответствующими прочностными характеристиками, приведенными в таблице выше.

DINA-nn Stahlton Кабели/тросы от *DINA-13* до *DINA-199* (*Y 1670C* с *ES 205000*)

HIAM-nn Stahlton Кабели/тросы от *HIAM-56* до *HIAM-421* (*Y 1670C* с *ES 205000*)

ПРИМЕЧАНИЕ: *Stahlton* (www.stahlton-bautechnik.ch) является крупным производителем канатов, тросов или вантов, а также всего необходимого оборудования по их устройству. Обозначения *DINA* и *HIAM* используются для маркировки канатов, производимые данной компанией.

Сечения кабелей/тросов отличаются от круглых сечений значениями нескольких понижающих коэффициентов, которые предварительно отбираются исходя из выбранных норм проектирования и типа сердечника:

<i>FE</i>	Текстильный сердечник
<i>FEN</i>	Сердечник из натурального/природного волокна (пенька)
<i>FEC</i>	Сердечник из синтетического тканого материала
<i>SE</i>	Стальной сердечник
<i>SES</i>	Сердечник в виде стального кабеля
<i>SEL</i>	Сердечник в виде стального витого троса

В Европейских нормах *EN 12385-4* в приложениях от *A* до *C* приводятся расчетные формулы некоторых характеристик:

Площадь сечение стального кабеля	$A_0 = C \cdot d^2$
Минимальное значение разрушающего усилия	$F_0 = K \cdot d^2 \cdot f_r$

Вес кабеля на единицу длины

$$M = W \cdot d^2$$

В нормах *DIN 3051 part 3* данные характеристики определяются по другим формулам:

Площадь сечение стального кабеля

$$q_m = f \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$$

Минимальное значение разрушающего усилия

$$F_{min} = k \cdot F_r = k \cdot q_m \cdot \sigma_z$$

Вес кабеля на единицу длины

$$G = q_m \cdot w$$

Значение коэффициента потерь ke , учитывающий тип крепления концов кабеля/троса, приводится в других нормативных документах, например, в *DIN 18800*. Формула расчета предельного усилия, возникающего в кабелях/тросах с диаметром более 60 мм и приведенная в приложении Еврокода *EN A.2*, не применяется. Данная формула не учитывает прочность материала, и она не применима в общих случаях.

Пользователю необходимо с особой тщательностью проверять значения всех свойств и коэффициентов, характеризующих кабельные элементы системы, так как, ко всему прочему, данные значения также зависят и от типа используемого антикоррозионного слоя и от направления использования данных элементов (например, при проектировании подвесных канатных дорог или фуникулеров). Сечения кабелей, введенные в состав ПК *SOFiSTiK*, могут использоваться только при моделировании кабельных элементов или шаблонных элементов, тип которых соответствует выбранному типу сечения кабеля.

ВНИМАНИЕ: Расчетная система с предварительно напряженными стальными тросами характеризуется разными коэффициентами запаса, как для бетона, так и для стали. Пользователю необходимо убедиться, что данное значение выбрано правильно для обоих из рассматриваемых материалов. Что насчет корректного значения модуля упругости материала, то за данной информацией желательно обратиться к производителю кабелей/тросов напрямую. Ниже приводятся приближенные значения модуля упругости:

Полностью закрытый (изолированный) кабель/трос	$160 \pm 10 \text{ кН/мм}^2$
Скрученный кабель/трос с защитным покрытием <i>Galfan</i> * <i>EN 12385</i>	$160 \pm 10 \text{ кН/мм}^2$
Скрученный кабель/трос из нержавеющей стали <i>EN 12385</i>	$130 \pm 10 \text{ кН/мм}^2$
Канат/вант из отдельных прядей	$100 \pm 10 \text{ кН/мм}^2$

* *Galfan*/Гальфан (ZA) — сплав цинка (Zn) содержащий 5% (от 4,7% до 6,2%) алюминия (Al). За счет алюминия, сплав характеризуется более высокой, чем у просто цинкового покрытия, коррозионной стойкостью.

3.31 SECT – Пользовательские поперечные сечения

См. также: *CS, INTE, SV, POLY, CIRC, PANE, PLAT, PROF, Армирование, CUT, SPT, SFLA, WIND, WPAR*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер поперечного сечения	-	1
<i>MNO</i>	Номер материала поперечного сечения	-	1
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	*
<i>MRFL</i>	Материал соединительной арматуры	-	*
<i>ALPH</i>	Угол поворота сечения	Град.	0
<i>YM</i>	Смещение всех ординат поперечного сечения (ввод эксцентриситета сечения)	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>ZM</i>	Смещение всех ординат поперечного сечения (ввод эксцентриситета сечения)	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>FSYM</i>	Подавление вращения главных осей <i>YES</i> параметр <i>IYZ</i> (площадь момента инерции) всегда равен 0 <i>NONE</i> параметр <i>IYZ</i> приравнивается 0, когда он меньше произведения $0.001 \cdot (IY + IZ)$	<i>LIT</i>	<i>NO</i>
<i>BTYP</i>	Предпочтительные типы балок: <i>CENT</i> ориентированная по центру балка <i>BEAM</i> балка с эксцентриситетом (опорная ось/ось привязки) <i>TRUS</i> только ферма (без изгиба) <i>CABL</i> только кабель/нить <i>COMP</i> Центральное-сжатый элемент <i>COLU</i> Колонна с эксцентриситетом	<i>LIT</i>	<i>BEAM</i>

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>BCY</i>	Кривая деформаций при продольном изгибе по оси <i>y-y</i>	<i>LIT</i>	*
<i>BCZ</i>	Кривая деформаций при продольном изгибе по оси <i>z-z</i>	<i>LIT</i>	<i>BCY</i>
<i>BCT</i>	Кривая деформаций при продольном изгибе с учетом кручения	<i>LIT</i>	-
<i>ALF</i>	Экспонента действия изгибающего момента <i>M_y</i>	-	*
<i>BET</i>	Экспонента действия изгибающего момента <i>M_z</i> <i>I</i> Как двутавровый профиль <i>SH</i> Как прямоугольный полый профиль	<i>-LIT</i>	*
<i>TITL</i>	Обозначение поперечного сечения	<i>Lit32</i>	*
<i>FEM</i>	Название базы данных, содержащей информацию по КЭ сетке (<i>FEM</i>) сечения	<i>Lit96</i>	-
<i>LTEM</i>	Случай нагружения (<i>LC</i>) в температурном поле	-	-
<i>T</i>	Параметр времени температурного поля	сек.	<i>last</i>
<i>LTAU</i>	Номер нагружения <i>LC</i> из базы данных <i>FEM</i> , в которой хранятся схемы распределений сдвиговых напряжений (для каждого нагружения <i>LC</i> на этапе возведения <i>CS 4</i>)	-	9900

Ввод пользовательских сечений в расчетную систему всегда начинаются с команды *SECT*, которая и определяет номер пользовательского сечения. Все дополнительные параметры, входящие в состав данной команды, характеризуют

задаваемое поперечное сечение, которое, в свою очередь, может состоять из нескольких отдельных сечений (внешний контур, внутренний периметр, армирование и т. д.). Ввод свойств для каждого такого поперечного сечения заканчивается либо следующим вводом команды *SECT*, либо командой *END*.

Пользовательские сечения делятся на три группы (см. п.п. 1.1):

- Сплошностенчатое/монолитное поперечное сечение
- Тонкостенное поперечное сечение
- Конечно-элементное сечение

Система координат y - z устанавливается для каждого сечения, созданного при помощи команды *SECT*. Данная система координат в большинстве случаев имеет привязку с опорной осью (ось привязки), которая проходит через конечные узлы балки. Все координатные значения, которые используются при вводе сечения *SECT*, относятся к этой системе координат. Направления осей данной координатной сетки идентичны направлениям локальной системы балочного элемента – см. п.п. 2.1 данного руководства (ось y влево, ось z вниз). Оси локальной системы координат y' и z' центрально ориентированной балки сдвигаются параллельно системе координат общего сечения, так что в данном случае начало координат всегда находится в центре тяжести поперечного сечения.

Ввод в систему преднапряженных арматурных пучков (модули *AQBS*, *GEOS*) невозможен без их привязки к системе координат. Пользователю стоит учитывать это при выборе начала координатной сетки – нулевая точка.

При желании, пользователь может повернуть поперечное сечение под любым углом и в любом направлении по отношению к главным осям (*ALPH 999*). То же самое касается и его переноса в пространстве (параметры *ALPH*, *YM* и *ZM*). Все возможные повороты касаются не глобальной системы координат, а самих элементов поперечного сечения, которые поворачиваются в локальной системе координат. Ввод значения для параметра *ALPH* запускает в модуле *AQB* анализ напряжений, возникающих в элементах сечения при их вращении вокруг главных

осей расчетной системы. При вводе команды *CTRL AXIS -2* в составе модуля *AQB* подобного эффекта не возникает.

С другой стороны, команды *FSYM YES* полностью подавляет вращения в системе вокруг главной оси. Это предназначено для сечений, характеризующих лишь половину наибольшего поперечного сечения, входящего в состав пользовательского сечения. Однако следует учесть, что при его (сечения) учете в работе общего (пользовательского) сечения в расчетной системе могут возникать очень опасные явления. Параметр *Iuz* оказывает значительное влияние на значения деформаций, а также значения усилий, возникающих в системах с граничными условиями. Этот параметр также характеризует одноосный изгиб элемента ($V_y = 0, M_z = 0$) в составе модуля *AQB*.

С помощью параметра *BTYP* пользователь может, исходя из своего предпочтения, присвоить определенный тип балочного элемента к расчетному сечению (см. таблицу выше). Полученная информация может быть использована для генерации конечно-элементной сетки и создания спецификации по минимальному армированию элемента.

При проектировании железобетонного поперечного сечения в модуле *AQB* всегда необходимо указать предполагаемое положение будущей арматуры – одиночную, линейную или периметрическую арматуру вводят в систему при помощи соответствующих параметров *RF*, *LRF*, *CRF* или *CURF*. Параметр *MRF* определяет номер материала арматуры. Если же материал соединительной арматуры отличен от материала основной арматуры, то в систему необходимо ввести комбинированное значение параметра *MRF*. В дальнейшем это комбинированное значение становится значением по умолчанию для команды *CUT* (п.п. 3.37 данного руководства).

Номер материала, как правило, должен вводиться в систему при помощи параметра *SECT*. Ввод материала для отдельных элементов сечения подходит только для ввода в расчетную систему композитных (составных) поперечных сечений. В случае композитных (составных) сечений, теоретические значения

свойств поперечного сечения рассчитываются исходя из того материала, который был введен в систему при помощи параметра *SECT*; например:

$$A_i = \frac{(\Sigma A \cdot E)}{E_{ref}} \quad (3.143)$$

Всем элементам поперечного сечения в произвольном порядке присваивается определенный идентификационный номер, который включает до четырех символов (цифр) в целом. В модулях *AQB* и *ResultViewer* вы можете задать отдельное рабочее окно для отображения интересующих пользователя конструктивных элементов сечения. Например, пользователь без особых затруднений может вывести на рабочее окно все элементы с нулем в конце идентификационного номера.

Также для оценки устойчивости элемента пользователь может вывести на экран кривую деформаций, возникающих при изгибе. Для вывода графика используются следующие параметры: 0 (нет), *a*, *b*, *c* или *d* (см. таблицу в п.п.3.29). Соответствующая техническая информация нужна для того, чтобы пользователь смог принять решение в случае расчета общих поперечных сечений. Модуль *AQUA* пытается в автоматическом режиме смоделировать большинство случаев, исходя из следующих значений, установленных в программе по умолчанию:

			Ось максимальных моментов инерции поперечного сечения (<i>strong</i>)	Ось минимальных моментов инерции поперечного сечения (<i>weak</i>)
Профили без сварных соединений				
Кольцевидное и SH сечения			<i>a</i>	<i>a</i>
U, L и сплошные круглые сечения			<i>c</i>	<i>c</i>
Двутавровое сечение	$h/b > 1.2$	$t \leq 40$ мм	<i>a</i>	<i>b</i>

		$t \leq 80$ мм	d	d
	остальные		b	c
все остальные				
<i>I-strong</i>	$> 1.67 \cdot I\text{-weak}$ и			
<i>I-t</i>	$< 0.50 \cdot I\text{-weak}$			
	$t_{max} \leq 40$ мм		b	c
	$t_{max} > 40$ мм		c	d
<i>I-strong</i>	$< 1.67 \cdot I\text{-weak}$ и			
<i>I-t</i>	$> 0.50 \cdot I\text{-weak}$			
	$t_{max} \leq 40$ мм		b	b
	$t_{max} > 40$ мм		c	c

Кривая потери устойчивости «e» может быть введена в систему традиционная кривая в соответствии с американскими нормами *AISC* с учетом гиперболы Эйлера при $\lambda > 0.5$ и квадратичной параболы для анализа области пластических деформаций. Значения коэффициентов запаса должны быть достаточно большие для этой кривой!

Согласно *EN 1993-1-1* для расчета предельных значений пластических деформаций, образующихся при взаимодействии изгибающих моментов, необходимо знать значения экспонент α и β . Поскольку эти экспоненты достаточно сильно зависят от типа анализируемого сечения, их можно задать собственноручно или определить, исходя из двух расчетных формул.

Примечание

Для некоторых команд (например, *TVAR* и *PROF*) имеет значение, учтены ли значения данных экспонент в составе сечения или отдельно от него. Команда *SECT 0* позволяет аннулировать влияние текущего сечения на расчетную систему.

3.31.1 Параметрические сечения

Очень часто, особенно при расчете мостов, очень похожие сечения строятся на основе какого-то шаблона (каких-то параметров). С учетом данного факта можно сделать вывод, что модуль *AQUA* позволяет не только использовать данный параметрический подход при построении сечения, но он также сохраняет всю информацию, связанную с параметрами, вместе с самим поперечным сечением в базе данных, что облегчает процесс создания прототипа/лекала будущего сечения.

Первоочередным решением данной задачи является вывод расчетных формул, которые бы позволили получить значения любой координаты или постоянного радиуса (*CIRC*, *CRF*). Формулы должны содержать до 256 символов, и представлена в следующем виде «= *formula*». Эти формулы будут сохранены в составе расчетного сечения и могут быть отформатированы для любого другого сечения с разными значениями свойств вдоль оси (см. *GAX/GAXP*) или же могут быть введены пользователем собственноручно (но только локально) при помощи команды *TVAR*.

Переменные в формулах должны иметь определенную размерность (единицу измерения), только при таком условии ее (формулы) интерпретация *#B+20* может обрабатываться программой конкретным способом. В простых случаях, по умолчанию, для расчета элементов составного сечения также можно использовать определенные единицы измерения. Как альтернатива, в программе имеется возможность привязки единицы измерения к конкретной расчетной формуле, но в таком случае все переменные, характеризующие данную формулу, не должны предварительно исчисляться в каких-либо единицах.

Следующие предустановленные переменные характеризуют ось элемента:

<i>#S_ACT</i>	Фактическое расстояние вдоль оси
<i>#S_XI(x)</i>	Массив значений параметра <i>s</i> , характеризующих линию опирания вдоль оси
<i>#S_XI(2.5)</i>	Соответствует значению параметра <i>S</i> в середине между 2-й и 3-й линией опирания

Впоследствии, исходя из значений координат трех точек опирания, пользователь может определить координаты любой другой точки расчетной системы. Также для определения значений координат можно использовать координаты концентраторов напряжений, вершины многоугольника, панели фермы (расстояние между узлами фермы) или элемента круглого сечения. Привязка к элементу системы осуществляется через его идентификационный номер, состоящий из 4-ех символов. Указанные координаты соответствуют тому элементу, к которому была осуществлена привязка привязке. Следует помнить, что если координаты не были получены в результате расчета, и если в систему была введена, либо команда *CTRL REFD 0*, либо была установлена привязка раньше, чем осуществлено обращение к базе данных проекта @, значения координат интерпретируются системой как абсолютные, которые впоследствии используются для экспорта сечений.

Кроме того, можно самостоятельно задать положение точки привязки на оси. Для этого необходимо, чтобы привязка была не к отдельному элементу, а к оси – привязка осуществляется через идентификационный номер оси с добавлением префикса () и двоеточия, например, «: AX_0». Локальные координаты (y , z) определяют расстояние в 3D системе до той же переменной (точка привязки), характеризующей ось привязки, проецируемой в плоскости сечения элемента.

Если в системе имеются точки с несколькими идентификационными номерами, то используется только первый номер этой точки, а другими программа пренебрегает. Если точка привязки не является частью самого сечения, то пользователю необходимо указать для нее номер материала 0. Однако следует учесть тот факт, что в расчетной системе может быть задействовано произвольное количество подобных привязок, так что точка привязки может использовать одну из этих уже существующих привязок. Для тонкостенных элементов начальная и конечная точка могут быть соединены при помощи привязки с определенным идентификационным номером.

Привязки могут использоваться для соединения отдельных точек, начальных и конечных точек элемента, однако примеры, рассмотренные ниже, имеют обобщенный характер. В итоге, параметр *REF* выполняет функции *REFP*, *REFA* или *REFD*.

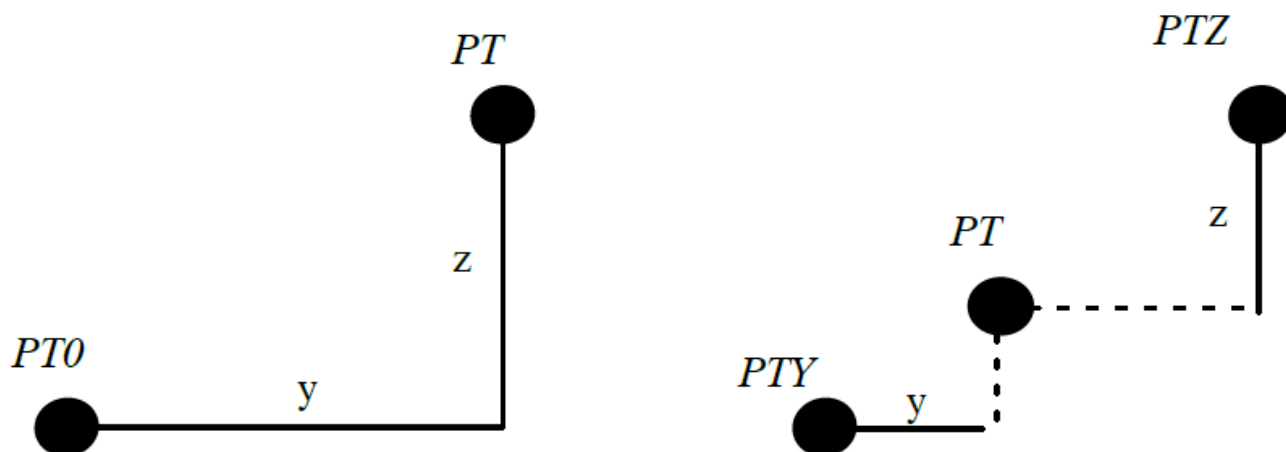


Рис. 3.44 – Привязка по Декартовой системе

Способ 1: Привязка по Декартовой системе

- Пользователь может задавать значения координат относительно точки привязки в абсолютных Декартовых координатах *y* и *z* (левое изображение на рис. 3.44), введя в систему:

REF PT0

В конечном итоге значение относительного расстояния сохраняется в системе как абсолютное значение или же оно рассчитывается по формуле, которая была выведена для данного типа привязки.

- Пользователь может задавать значения координат относительно двух точек привязки в абсолютных Декартовых координатах *y* и *z* (правое изображение на рис. 3.44), введя в систему:

REF PTY PTZ

Значение *y*-ординаты откладывается относительно *PTY*, а значение *z*-ординаты откладывается относительно *PTZ*. Если необходима привязка

только по одной ординате, то для другой необходимо ввести значение '0000'. Наиболее рационально было бы ввести только одну привязку, введя перед этим символ >, что позволяет задействовать значение только правой ординаты у, или же символ ^, который задействует значение ординаты z.

- Также пользователь может задать отрицательные привязки. Позднее значения координат будут вводиться с альтернативным знаком, что позволит легко отзеркалить уже введенные в систему элементы. Для точек, расположенных в центре или на линии отзеркаливания, необходимо ввести два одинаковых значения координат с разными знаками. ($y_{new}=2 \cdot y_{mirr}-y_{org}$)

REF -PTY	Отзеркаливание относительно точки
REF PTY -PTY	Отзеркаливание относительно оси у
REF -PTY PTY	Отзеркаливание относительно оси z

Способ 2: Привязка по полярной системе

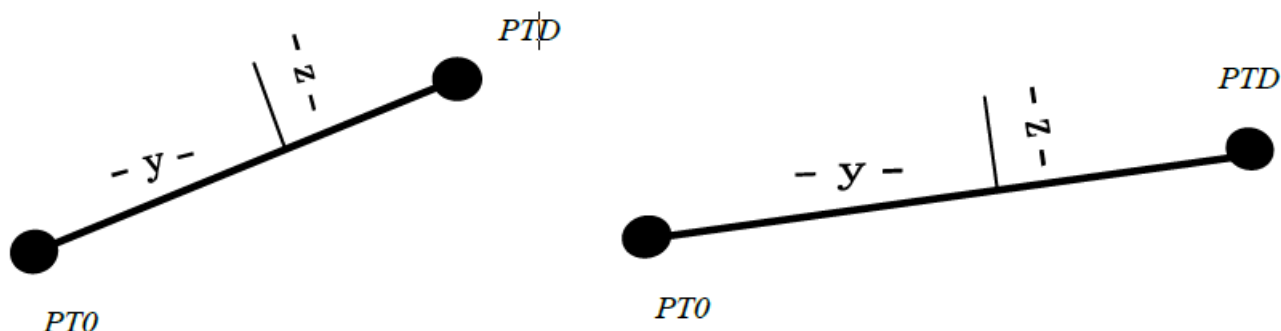


Рис. 3.45 – Привязка по полярной системе

Точка *PTD* (введенная в систему как *REFD*, *RFDA* или *RFDE*) определяет направление привязки относительно точки *PT0*. Вместо точки также можно указать имя переменной или формулу, содержащую угол отклонения направления в радианах: " $= \# \text{VARNAME}$ "

В дальнейшем координата у откладывается в радиальном направлении (от центра к кривой радиуса) вдоль привязки, а координата z перпендикулярна

привязки (положительное направление z влево относительно привязки).
Использование подобного способа ориентирования привязки осуществляется при помощи следующего ввода:

REF PT0 ~PTD	Абсолютные значения координат
REF PT0 +PTD	Значение координаты только вдоль рассматриваемого направления
REF PT0 *PTD	Значение координаты в обоих направлениях

При знаке (+) будет сохраняться установленное соотношение расстояний, как в радиальном направлении, так и в перпендикулярном направлении.

Способ 3: Привязка к элементу конструкции

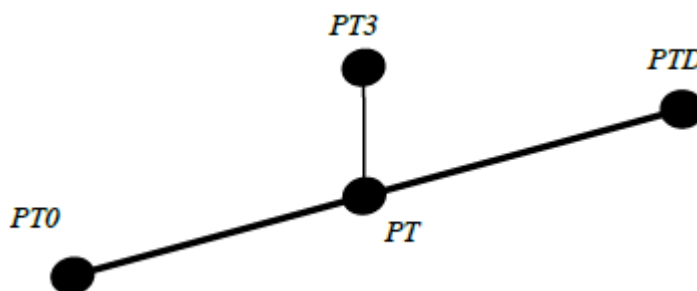


Рис. 3.46 – Привязка к элементу конструкции

Если известны положения трех точек, то третьей точке может быть присвоен префиксный оператор, позволяющий в дальнейшем рассчитать расстояние или высоту, которые должны быть отложены от этой точки, и который позволяет определить в процессе поиска соответствующую точку на линии *REF-RFD*:

REF PT0 PTD >PT3	Значение ординаты y
REF PT0 ^PT3	Значение ординаты z
REF PT0 PTD	Точка, перпендикулярная линии элемента

Если в первых двух способах третья точка обозначается как самостоятельный элемент системы, то при использовании этого способа в системе создаются точки с одинаковым значением ординаты y , которые необходимы,

например, для точек с фиксированным расстоянием между ними, однако, значение ординаты z (высоты) изменяется в зависимости от угла наклона поперечного сечения.

Для круглых сечений пользователь может ввести дополнительную точку. Расстояние от этой точки до центра будет соответствовать радиус окружности. Для стальных профильных элементов угол поворота используется аналогичным образом.

REF REFR PTR

Примеры, в которых используется большинство из представленных функций, приведены в файлах от *AQUA31.DAT* до *AQUA33.DAT* в каталоге *AQUA.DAT*.

Примечание

Параметры ввода эксцентриситета YM и ZM в составе команд *SECT* и *POLY* не используются.

3.31.2 Конечно-элементные сечения

При решении сложных нестандартных задач, связанных с проектированием, недостаточно вводить только контур будущего сечения. В таких случаях пользователю необходимо построить конечно-элементную модель сечения. Ячейки конечно-элементной сетки могут быть созданы в модуле *AQUA* или могут быть импортированы из вторичной базы данных. Как правило, во вторичной базе данных также хранится информация о полях распределения температур. Пользователь, исходя из результатов, полученных в ходе этого единичного теплового анализа, также может копировать сечение из этой базы данных, что особенно целесообразно при вводе в систему сечений с различными схемами армирования. При вводе команды «*SECT: nnn*» сечение *nnn* будет автоматически разбито на конечные элементы – построение конечно-элементной сетки в

плоскости сечения (*FEM*). В этом случае при использовании параметра *RF* возможен импорт схемы армирования.

Сечение будет сформировано из отдельных точек интегрирования, которые расположены в центре всех плоских *QUAD* элементов. Они могут быть импортированы группами при помощи команды *POLY*, чтобы была возможность проведения анализа элемента с учетом его этапов возведения, любые или все сразу, если нет необходимости в учете этапов возведения.

Так как данная функция программы позволяет анализировать все свойства и характеристики любого типа сечения (например, вторичное кручение для сплошностенчатого/монолитного сечения), то она является общей для ввода и анализа сечений в расчетной системе. Все дополнительные элементы (концентраторы напряжений, арматура/армирование, плоскость сдвига) вводятся в расчетную систему как и раньше (см. другие руководства).

С помощью параметра *LTAU* единица измерения депланации/деформаций в сечении и распределения сдвиговых напряжений будут сохранены в исходной базе данных. Таким образом, имеется возможность просмотра этих результатов при помощи модуля *WING/WINGRAF*.

3.32 CS – Этапы возведения элемента конструкции

См. также: [SECT](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Этап начала учета работы элемента в процессе возведения (ввод временных конструктивных элементов)	-	*
<i>TITL</i>	Обозначение этапа возведения	<i>LIT32</i>	-
<i>ATIL</i>	Этап конца учета работы элемента в процессе возведения (вывод временных конструктивных элементов)	-	-
<i>LTEM</i>	Случай нагружения (<i>LC</i>) в температурном поле	-	-
<i>T</i>	Параметр времени температурного поля	сек.	предыдущее значение

С помощью команды *CS* пользователь может задать до 9 этапов возведения для соответствующего поперечного сечения. Все элементы сечения, введенные в систему после команды *CS*, будут учтены в программе именно на этом этапе. При вводе в систему последующих этапов *CS* все элементы сечения, введенные на предыдущих этапах, будут также учтены в программе.

Если часть сечения должна быть активна только некоторое время, то необходимо ввести значение для параметра *ATIL*. Данный параметр характеризует последний этап работы элемента сечения впоследствии его возведения. Этапы возведения *CS* должны быть введены в систему в восходящем, по мере строительства элемента, порядке при помощи параметра *NO*, но для этого случая возможно создать несколько строк *CS* с одинаковым значением параметра *NO*, чтобы несколько элементов поперечного сечения стали активны на одном и том же этапе возведения. Тем не менее, программа учитывает последовательность

ввода элементов исходя не из значения параметра *NO*, а исходя из номера этапа (расчетного блока) *CS*.

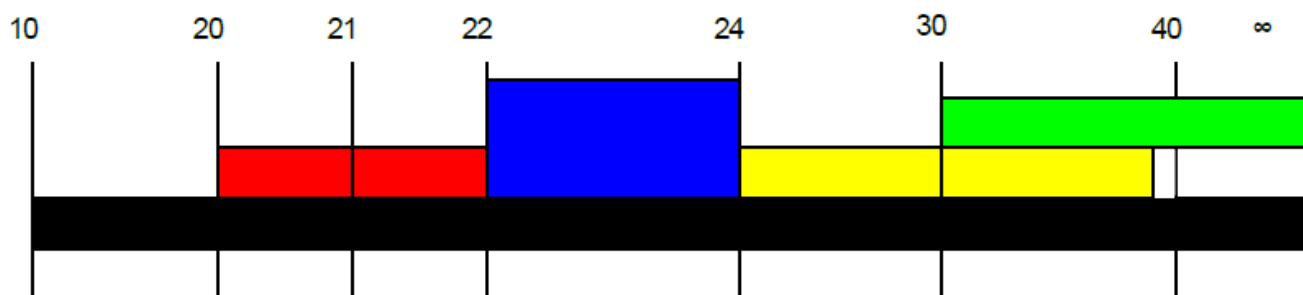


Рис. 3.47 – Схема процесса возведения (строительства) элемента

На рисунке 3.47 описан процесс возведения элемента. Поскольку этап 21 не влияет на само сечение, его не нужно обозначать (вводить) в системе. То же самое относится к любому другому этапу строительства, такому как, например, этап создания предварительного напряжения в конструкции. Последовательность ввода данных подробно рассмотрена ниже:

- CS 10* ; черный участок на рисунке, *QGroup 1*
- CS 20 ATIL 22* ; красный участок на рисунке, *QGroup 2*
- CS 22 ATIL 24* ; синий участок на рисунке, *QGroup 3*
- CS 24 ATIL 39* ; желтый участок на рисунке, *QGroup 4*
- CS 30* ; зеленый участок на рисунке, *QGroup 5*

Данная последовательность команд позволяет создать 6 этапов (расчетных блоков) для возведения элемента сечения:

- NO* ; Общее сечение на заключительном этапе его возведения 40,
QGroup "C040"
- NO. 1* ; Первый этап возведения сечения, этапы 10-19,
QGroup "C010"
- NO. 2* ; Второй этап возведения сечения, этапы 20-21,
QGroup "C020"
- NO.3* ; Третий этап возведения сечения, этапы 22-23, *QGroup "C022"*

- NO.4* Четвертый этап возведения сечения, этапы 24-29,
QGroup “C024”
- NO.5* Пятый этап возведения сечения, этапы 30-39, *QGroup “C030”*

Данные параметры характеризуют этапы возведения сечения, отличающиеся разными характеристиками (жесткостными, геометрическими и др.) данного поперечного сечения. Значения параметра *ATIL* для этапов “*C020*” и “*C022*” будут автоматически расширены на последующие этапы возведения (на “*C022*” и “*C024*” соответственно). Для этапа “*C024*” значение параметра *ATIL* должно быть задано пользователем самостоятельно, так как, согласно схеме 3.47 этап “*C024*” заканчивается, когда начинается “*C030*”, но характеристики поперечного сечения в *QGroup 4* должны сохраняться до этапа 39 (желтый участок). Переход на заключительный этап возведения сечения может быть осуществлен, либо путём самостоятельного ввода заключительного этапа *CS 40*, либо путем деактивации последнего этапа “*CO***”*S* из системы на более ранней стадии, например, как “*C030*” на рисунке 3.47 (команда *ATIL*). Автоматическая генерация промежуточных значений и стадий отсутствует, после ввода этапа *CS 20 ATIL 33* не будет создана последующая стадия со значением 34.

Параметр *QGroups* характеризуют главную и вторичную группы элементов, которые были сформированы во вторичной базе данных сечения (используется только команда *CTRL STYP FEMX*, см. п.п. 3.4).

При формировании группы элементов выполняется сопоставление этапов возведения *CS* с отдельными элементами, а соответствующие им (элементам) номера этапов *CS*, будут сортироваться исходя из номеров этапов *CS*, введенных в состав группы. С учетом этого программа подгоняет значение параметра *N* по умолчанию. В результате этих оптимизационных процессов в системе образуются пробелы или, говоря производственным языком, технологические перерывы, которые можно использовать для ввода промежуточных стадий, например, предварительного напряжения. Например, в промежутке между этапами возведения 10, 20 и 30, которые были введены в систему с помощью модуля *AQUA*, на этапе 25 поперечное сечение, которое было введено на этапе 20, будет

работать с учетом всей напрягаемой арматуры вплоть до 25 стадии, если соответствующая стадия 25 для преднапряжения была создана в модуле *TENDON*.

На каждом этапе возведения при помощи команды *SV* каждому материалу, используемому при создании сечения, можно присвоить соответствующий фактор для модуля упругости и модуля сдвига, но только после команды *CS*. Кроме того, при импорте поперечного сечения с результатами его расчета в модуле *HYDRA* пользователь может обозначить данный этап возведения как этап пожара (учет влияния пожара/высоких температур) для дальнейшего проектирования.

3.33 SV – Дополнительные свойства поперечного сечения

См. также: [SECT](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>IT</i>	Момент инерции относительно оси закручивания	$[M^4]_{1014}$	-1.0
<i>AK</i>	Область Бредта	$[M^2]_{1012}$	*
<i>YSK</i>	Координаты центра сдвига относительно базовой системы координат	<i>LIT</i> /*	*
<i>ZSK</i>	базовой системы координат	<i>LIT</i> /*	*
<i>CM</i>	Модуль депланации/сопротивление депланации	$[M^6]_{1016}$	*
<i>CMS</i>	Модуль депланации при сдвиге/сопротивление депланации при сдвиге	$[M^4]_{1014}$	*
<i>AY</i>	Площадь деформации при сдвиге по оси y	$[M^2]_{1012}$	*
<i>AZ</i>	Площадь деформации при сдвиге по оси z	$[M^2]_{1012}$	*
<i>AYZ</i>	Площадь деформации при сдвиге в плоскости yz		
<i>LEVY</i>	Минимальное значение рычага при действии сдвигового усилия <i>VY</i>	[MM] ₁₀₁₁	-
<i>LEVZ</i>	Минимальное значение рычага при действии сдвигового усилия <i>VZ</i>	[MM] ₁₀₁₁	-
<i>MNO</i>	Номер материала для следующей команды	-	*
<i>DEFF</i>	Расчетная/эффективная толщина участка сечения	[MM] ₁₀₁₁	2A/U
<i>FACE</i>	Модуль упругости материала на текущем этапе возведения	-	1.0
<i>FACG</i>	Модуль упругости материала при сдвиге на текущем этапе возведения	-	<i>FACE</i>

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>AG</i>	Дополнительный вес/масса	[кН/м] ₁₁₉₁	0.0
<i>NPLT</i>	Сопротивление пластическим деформациям при осевом растяжении	[кН] ₁₁₀₁	*
<i>NPLC</i>	Сопротивление пластическим деформациям при осевом сжатии	[кН] ₁₁₀₁	*
<i>VYPL</i>	Сопротивление пластическим деформациям при сдвиге <i>y-y</i>	[кН] ₁₁₀₂	*
<i>VZPL</i>	Сопротивление пластическим деформациям при сдвиге <i>z-z</i>	[кН] ₁₁₀₂	*
<i>MTPL</i>	Сопротивление пластическим деформациям при первичном кручении	[кНм] ₁₁₀₃	*
<i>MYPL</i>	Сопротивление пластическим деформациям при изгибе <i>y-y</i>	[кНм] ₁₁₀₄	*
<i>MZPL</i>	Сопротивление пластическим деформациям при изгибе <i>z-z</i>	[кНм] ₁₁₀₄	*
<i>MBPL</i>	Сопротивление пластическим деформациям при действии бимоента	[кНм ²] ₁₁₀₅	*
<i>MT2P</i>	Сопротивление пластическим деформациям при действии следующего (вторичного) кручения	[кНм] ₁₁₀₃	*

В большинстве случаев, эти свойства поперечного сечения будут рассчитываться автоматически. Пользователю необходимо задать только погрешность для данных характеристик.

Параметр *AK* характеризует площадь эквивалентного полого сечения согласно Бредту. Исходя из действия кручения, данный параметр используется для определения продольной арматуры и соединительной (поперечной) арматуры.

Однако, в большинстве случаев, параметр AK следует задавать неявно, то есть через значение сопротивления кручению арматуры.

Для параметра IT пользователь может ввести абсолютное значение (0. или положительное). Если для данного параметра ввести скалярное значение, момент инерции, вычисленный программой, умножается на коэффициент. Значение 0.5 [-] или 50 [%] характеризует поперечное сечение лишь с 50 процентами крутящего момента инерции.

Параметры YSC и ZSC позволяют ввести в систему обязательный центр вращения или, в случае только одного значения, ограничительную плоскость или плоскость ограничения. Параметр «С» можно использоваться в обоих случаях – совмещение введенной ординаты с центром тяжести сечения.

Если нет необходимости принимать во внимание значения сдвиговых деформаций, несмотря на потребность в подробном анализе сдвиговых напряжений, значения параметров AY , AZ , AYZ и CMS должны быть приравнены к «0». Значение 0,5 [-] или 50 [%] соответствует площади сдвига поперечного сечения, рассчитанного лишь на 50 процентов.

Для задания необходимого сдвигового усилия на этапе II минимальные значения рычагов могут быть введены в систему с помощью параметров $LEVY$ и $LEVZ$, что в конечном итоге позволит получить наиболее приемлемые результирующие значения (например, $0.90d$) или определить самый неблагоприятное положение действия сдвигового усилия (например, момент = 0). Значения для данных параметров, исходя из положения действия силы по высоте или ширине сечения, вводятся в систему как абсолютные значения или как коэффициенты (факторы).

Для анализа влияния ползучести и усадки бетона требуется значение эффективной толщины/высоты d_{eff} ($DEFF$). Данный параметр характеризует участок элемента площадью A и длиной U , который имеет контакт с внешней средой – расчетная формула $2A/U$. Коэффициент контакта с внешней средой может быть определен, как для вершин многоугольных сечений, так и для круглых сечений. Если в системе не указаны иные значения, то внешние границы

сечения будут характеризоваться соотношением, равным 1.0, а внутренние границы 0.0. Однако пользователь может собственноручно задать необходимые значения характеристик для каждого материала сечения при помощи команды *SV*.

На этапах возведения сечения при помощи команды *SV MNO* пользователь может ввести в систему по два коэффициента упругости и модуля сдвига. Они будут использоваться, в основном, для оценки значений характеристик сечения. Согласованная обработка расчетных значений в модуле *AQB* с учетом всех коэффициентов все еще находится на стадии разработки.

Во многих случаях, чтобы учесть особые условия, на практике пользователю рекомендуется самостоятельно вводить значения усилий, вызывающих образование пластических деформаций, и моментов или же вводить граничные условия для тех значений, которые были получены в результате расчета системы в модуле *AQUA*. Последнее легко осуществимо, если самостоятельно ввести в систему предел пластичности, который должен быть сразу перезаписан в рассчитываемом модуле *AQUA*, либо путем ввода только части данной характеристики в состав расчетной системы на языке *CADINP* в виде [-] или [%] соответственно, что позволяет в последствии масштабировать данное значение по умолчанию. Например, ввод значения для параметра *MBPL* до 0.8[-] приведет к тому, что модуль *AQUA* будет учитывать лишь 80% от первоначально рассчитанного значения бимоента, при действии которого в элементе возникают пластические деформации. По умолчанию значение для каждого параметра равно 1.0[-] или 100%, т. е. если тот или иной параметр не был самостоятельно задан пользователем, модуль *AQUA* не будет изменять значения усилия, при действии которого в элементе возникают пластические деформации (пластические усилия), или момента.

Стоит также отметить, что из всех параметров в системе могут быть заданы или изменены только пластические усилия и моменты. С учетом этого можно сказать, что модуль *AQUA* получит соответствующее расчетное значение, путем деления, введенного в систему значения, на коэффициент запаса по материалу.

Если в системе присутствует составное (композитное) сечение или сечение, материал которого обладает анизотропными свойствами (различные предел текучести при растяжении и сжатии), то в таком случае значения параметров *NPLC* и *NPLT* могут иметь большое значение. В этом случае модуль *AQUA* будет использовать параметр *NPLT* для учета характеристики предела пластичности для растянутого сечения элемента, а параметр *NPLC* для учета характеристики предела пластичности для полностью сжатого сечения элемента. Для несоставных сечений (однородных сечений) используется только параметр *NPLC*, который характеризует всю плоскость (составляющие) сечения.

3.34 *POLY* – Многоугольный элемент поперечного сечения/отверстие в элементе конструкции

См. также: *SECT*, *CIRC*, *VERT*, *CUT*, *SPT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>TYPE</i>	<p>Тип многоугольника</p> <p><i>O</i> Многоугольник введенный в систему при помощи команды <i>VERT</i></p> <p><i>OPY</i> тоже самое, но симметричный относительно оси <i>y</i></p> <p><i>OPZ</i> тоже самое, симметричный относительно оси <i>z</i></p> <p><i>RECT</i> Централно ориентированный многоугольник с соотношением ширина/высота <i>DY/DZ</i></p> <p><i>REC+</i> Положительный многоугольник (смещение оси вниз – эксцентриситет)</p> <p><i>REC-</i> Отрицательный многоугольник (смещение оси вверх – эксцентриситет)</p> <p><i>GRP</i> Группа <i>FEM</i> (КЭС), выбранная командой <i>SECT FEM</i></p>	<i>LIT</i>	<i>O</i>
<i>MNO</i>	Номер материала (0 = отверстие) или групп, которая будет импортирована для параметра <i>GRP</i>		
<i>YM</i>	Смещение всех ординат поперечного сечения (ввод эксцентриситета сечения)	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>ZM</i>	Смещение всех ординат поперечного сечения (ввод эксцентриситета сечения)	[мм] ₁₀₁₁	0

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>DY</i>	Габарит многоугольника	[ММ] ₁₀₁₁	!
<i>DZ</i>	Габарит многоугольника	[ММ] ₁₀₁₁	!
<i>SMAX</i>	Максимальная длина кромки многоугольника	[ММ] ₁₀₁₁	-
<i>EXP</i>	Особые свойства кромки многоугольника – команда <i>MEXT</i>	<i>Lit4</i>	-

ПРИМЕЧАНИЕ: В последующих абзацах речь пойдет не о конкретных многоугольных или круглых элементах сечения, а об вводе отверстий в состав сечения, как отдельного элемента, имеющего форму круга или многоугольника.

Если в системе не выбран тип многоугольника (*REC**), то после команды *POLY* должен следовать ввод вершин многоугольника при помощи команды *VERT*. Последовательность ввода вершин многоугольника (по часовой стрелке или против часовой стрелки) заблокирована в программе. Контур многоугольного элемента будет автоматически замкнут программой. В случае симметричного положения многоугольников, исходный многоугольник отзеркаливается перед замыканием контура.

Отверстие создается автоматически, когда многоугольники или круги перекрывают друг друга, а истинное отверстие характеризуется многоугольным или круглым элементом с номером материала 0. Пользователю следует избегать ввода нового полигонального отверстия в плоскости уже заданного отверстия, то есть вводить новое отверстие с тем же номером материала или объединять его с уже с комбинированными элементами, образующие отверстие в элементе.

Параметры *YM* и *ZM* позволяют задать смещение (ввод эксцентриситета) для конкретного многоугольного элемента. Команды *VERT* или *DVER* используют сдвинутую на значение *YM* и *ZM* систему координат. Данные по симметрии также используют сдвинутую систему координат. Поэтому, подобные отверстия могут быть сгенерированы достаточно просто.

Многоугольнику можно легко присвоить особый тип (см. таблицу). Для данного многоугольника можно задать габариты DY и DZ , а также координаты центральной, верхней, нижней или боковой точек, расположенных посередине кромок (граней) элемента отверстия, в координатах YM и ZM .

Модуль AQB отображает напряжения только в определенных точках многоугольника или концентраторах. Таким образом, полезным будет разделить более длинные грани отверстия на более короткие элементы. Разделение кромки отверстия на составляющие можно произвести при помощи параметра $SMAX$ или, как альтернативный способ, при помощи параметров PHI в составе команды $VERT$. Однако в этом случае для симметричных многоугольников, чтобы обеспечить разбиение кромок замыкающего контура, рекомендуется задать дополнительные вершины на оси симметрии. Для многоугольников типа REC^* значение параметра $SMAX$ предварительно установлено и имеет значение $DZ/4$.

Параметр EXP позволяет ввести в систему особые параметры материала ($MEXT$) для отдельных краев многоугольника. Значение, введенное в состав данного параметра, будет характеризовать данный многоугольник впоследствии по умолчанию.

3.35 VERT – Вершины многоугольника в абсолютных координатах

См. также: [SECT](#), [POLY](#), [Параметрические сечения](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение вершины многоугольника	<i>Lit4</i>	*
<i>Y</i>	Координаты вершины --/-- относительно	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>Z</i>	смещенной системы координат <i>YM</i> , <i>ZM</i>	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>R</i>	Радиус	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>RHI</i>	Максимальный угол закругления в вершине --/--	град.	*
<i>TYPE</i>	Тип вершины <i>O</i> Внешний периметр <i>TP</i> Пересечение касательных	<i>LIT</i>	*
<i>EXP</i>	Особое свойство в точке/степень контакта (от 0.0 до 1.0) с окружающей средой в точке	<i>Lit4</i>	*
<i>REFP</i>	Точка привязки/начальная точка	<i>Lit8</i>	*
<i>REFD</i>	Исходная направляющая точка	<i>Lit8</i>	*
<i>REFS</i>	Исходные координаты типовых точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	*

Параметр *NO* используется для идентификации вершины при любом значении напряжений. Если ничего не вводится, то модуль *AQUA* генерирует внутреннюю нумерацию вершин многоугольника в автоматическом режиме.

Расстояние между смежными вершинами многоугольника должно быть не менее 0,0001 м. Многоугольник определяется из последовательности его вершин, а не из их количества. Количество вершин ограничено – 255 точек на один многоугольник.

Если в систему введен радиус, то возможно следующее:

- В точках пересечения (вершина многоугольника) с заданным радиусом создается закругление (сопряжение). Если радиус имеет отрицательное значение, то вместо закругления создается фаска, а значение R используется как расстояние от вершины до крайних точек фаски.
- В других случаях между вершинами устраиваются дополнительные точки, чтобы замоделировать закругленный угол со значением < 180 градусов. Угол закругления вводится в систему при помощи команды *CTRL HMIN/HTOL*. Если значение R положительно, площадь многоугольника будет увеличена. Однако при явном вводе значения параметра RHI в систему будут сгенерированы соответствующие вершины. Знак параметра RHI характеризует направление выгиба дуги.

Неэффективные области могут быть заданы в системе с помощью команды *NEFF*. Во всех участках сечения, расположенных в пределах этих областей, не действуют отдельные, выбранные пользователем, усилия. Данные области формируются из отдельных многоугольных элементов.

Старый метод разделения многоугольника на составляющие его участки больше не используется. В нем неэффективные точки задаются либо с помощью команды *NEFF*, либо с помощью команды *INEF* для вершины *TYPE* или путем ввода значений параметров *YEFF* или *ZEFF* для создания дополнительных вершин в заданных пределах в автоматическом режиме.

Характеристики участков общих сечений используется только для расчета площади, а также напряжений, возникающих при кручении, и решения интегрального уравнения. Все геометрические моменты инерции вычисляются только исходя из характеристик эффективных (рабочих) участков сечения (см. руководство к модулю *AQB*). Следует также отметить, что эффективная ширина в большинстве случаев зависит от условий нагружения *LC* и от конечной цели расчета.

Параметр *EXP* позволяет присвоить отдельным, выбранным пользователем, кромкам многоугольного элемента особые характеристики материала (*MEXT*).

Для задания показателя степени контакта элемента с окружающей средой используется среднегеометрическое значение, т. е. если одна из двух вершин кромки многоугольника характеризуется степенью контакта 0.0, то общее значение степени для всей кромки в целом будет иметь такое же значение.

3.36 CIRC – Элементы круглого сечения

См. также: [SECT](#), [POLY](#), [Параметрические сечения](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение элемента круга	<i>Lit4</i>	*
<i>Y</i>	Координаты центральной точки	[ММ] ₁₀₁₁	0
<i>Z</i>	окружности относительно базовой системы координат	[ММ] ₁₀₁₁	0
<i>R</i>	Радиус окружности	[ММ] ₁₀₁₁	-
<i>MNO</i>	Номер материала (композитное сечение) 0 пустота/отверстие	-	(<i>SECT</i>)
<i>EXP</i>	Особое свойство в точке/степень контакта (от 0.0 до 1.0) с окружающей средой в точке	<i>Lit4</i>	-
<i>REFP</i>	Исходная точка по центру	<i>Lit8</i>	*
<i>REFD</i>	Исходная направляющая точка	<i>Lit8</i>	*
<i>REFS</i>	Исходные начальные координаты	<i>Lit8</i>	*
<i>REFR</i>	Исходная точка центра окружности	<i>Lit8</i>	*

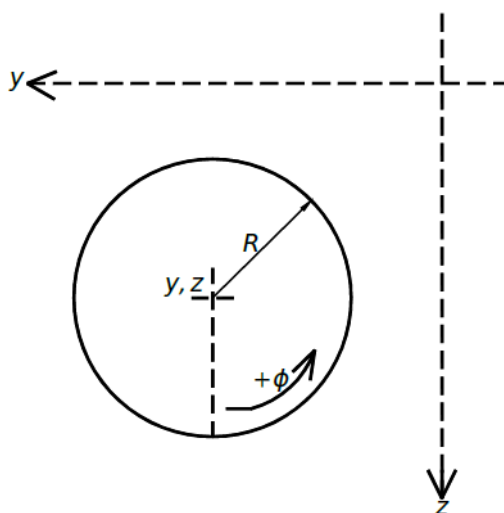


Рис. 3.48 – Круглое поперечное сечение

Последовательность номеров участков круглого сечения формируются программой автоматически, когда значение для параметра *NO* не задано. Значение для *NO* может быть выбрано произвольно. Когда элемент *CIRC* накладывается на элемент, выполненный из другого материала, тот весь этот материал пересчитывается программой автоматически.

3.37 CUT – Плоскость сдвига и участки расчетного сечения

См. также: [SECT](#), [POLY](#), [CIRC](#), [Параметрические сечения](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение плоскости сдвига или участка сечения	<i>Lit3</i>	!
<i>YB</i>	Ординаты сдвигаемого сегмента сечения	[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>ZB</i>		[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>YE</i>		[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>ZE</i>		[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>NS</i>		Нормальное усилие перпендикулярное плоскости сдвига	[кН/М] ₁₁₁₁
<i>MS</i>	Момент перпендикулярный плоскости сдвига	[кНм/М] ₁₁₁₂	0.
<i>WTM</i>	Сопротивление кручению в центре элемента	[1/М ³] ₁₀₁₈	*
<i>WTD</i>	Дополнительное сопротивление для кромок элемента	[1/М ³] ₁₀₁₈	*
<i>MNO</i>	Номер материала плоскости сдвига	-	(<i>SECT</i>)
<i>MRF</i>	Номер материала поперечной арматуры	-	(<i>SV</i>)
<i>LAY</i>	Слой поперечной арматуры	-	1
<i>ASUP</i>	Минимальное поперечное армирование	-	*
<i>OUT</i>	Выходные параметры (больше не используются)	<i>LIT</i>	<i>MAE</i>
<i>TYPE</i>	Тип плоскости сдвига (см. ниже)	<i>LIT</i>	*
<i>VYFK</i>	Частичное воздействие сдвигающего усилия (коэффициент) по оси <i>VY</i>	-	*
<i>VZFK</i>	Частичное воздействие сдвигающего усилия (коэффициент) по оси <i>VY</i>	-	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>INCL</i>	Наклон соединительной арматуры относительно оси арматурного стержня	кот. град.	90
<i>BMAX</i>	Ширина эквивалентного полого сечения	*/LIT	*
<i>BRED</i>	Не учитываемая ширина (полость трубы)	[мм] ₁₀₁₁	0.
<i>CINT</i>	Коэффициент шероховатости поверхности	-	*
<i>MUE</i>	Коэффициент трения поверхности	-	*
<i>SXE</i>	«расстояние между трещинами» <i>AASHTO</i>	*	0
<i>TANA</i>	Минимальный наклон раскоса фермы	-	-
<i>REFA</i>	Исходная начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDA</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSA</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>REFE</i>	Исходная конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDE</i>	Направляющая конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSE</i>	Исходные координаты типовых конечных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-

С помощью команды *CUT* можно указать участок сечения, который будет рассчитан из учета действия на него сдвигающего усилия, и/или минимальное армирование или ширину раскрытия трещины, расположенной на обозначенном участке сечения. Для анализа сдвиговых напряжений, возникающих в бетонных поперечных сечениях, в систему необходимо ввести сдвигающее усилие и приложить его к соответствующей плоскости (плоскость сдвига). Без ввода команды *CUT*, в системе задается до двух плоскостей сдвига, проходящих через центр тяжести сечения (см. *CTRL STYP*). В результате, так как данные плоскости не обязательно должны проходить через наименьшую по ширине зону растяжения, программа выдает предупреждение в случае, когда пользователь

вводит в систему сложные по форме многоугольные элементы без плоскостей сдвига. Пользователь несет полную ответственность за ввод достаточного количества плоскостей сдвига, так как, исходя из результатов их анализа, можно определить все наиболее неблагоприятные, в плане работы, участки сечения.

Параметр *TYPE* характеризует некоторые важные свойства плоскости сдвига, необходимые для их расчета. Доступны следующие типы плоскостей:

- *ACT* Расчет только ширины раскрытия трещины
- *WEB* Ребро (ребро жесткости, перегородка в плите) поперечного сечения
WRED Ребра со сниженной допустимой прочностью
- *FLAN* Кромка/полка поперечного сечения
FFUL Кромка/полка с увеличенной допустимой прочностью
- *INTE* Граница раздела между конструктивными элементами
INDE Зубчатая граница раздела при сдвиге
ROUG Грубая граница раздела при сдвиге (неровная поверхность)
EVEN Ровная граница раздела при сдвиге (ровные поверхность)
SMOO Максимально гладкая граница раздела при сдвиге

Значения коэффициентов *CINT* и *MUE* определяются из *EN 1992* или *DIN 1045-1* (2008). При проектировании в соответствии со старыми нормами *DIN 1045-1* (п.п. 10.3.6) значение коэффициента *CINT* должно быть указано в пределах $h_{ct} > 1$.

- *SLAB* В особых случаях (например, полая плита) можно рассчитать плоскость сдвига любого сечения, такого как плиты.

В большинстве случаев ввод параметров *WRED/FLAN* характеризует структурированные сечения, тогда как параметры *WEB/FFUL* характеризуют компактные сечения. При проектировании сооружений возникают задачи, для решения которой необходимо знание минимальной толщины ребер жесткости, которая определяется в процессе анализа плоскостей сдвига типа *WEB*.

В соответствии с *DIN 1045* (1978) эта информация используется для активации области сдвига 3. Однако в этом случае задаваемая минимальная высота ребер 30 см может аннулировать предыдущий ввод.

В *AASHTO 2005* приведены две методики расчета влияния сдвига (5.8.3.), в которых учитывается доля достаточного минимального поперечного армирования элемента. Если требуется меньшая доля минимального армирования, то пользователю необходимо ввести в систему параметр «расстояние между трещинами» (*SXE*), который зависит от максимального размера заполнителя бетона a_g [мм] и максимального расстояния между продольными трещинами вдоль арматуры s_x :

$$s_{xe} = s_x \frac{35}{a_g + 16} < 2000mm \quad (3.144)$$

В зависимости от знака плоскости сдвига, на рисунке 3.49 представлена схема действия внутренних усилий и сопротивления кручению. Знак параметра *INCL* характеризует вращение от оси стержневой арматуры в направлении нормали n .

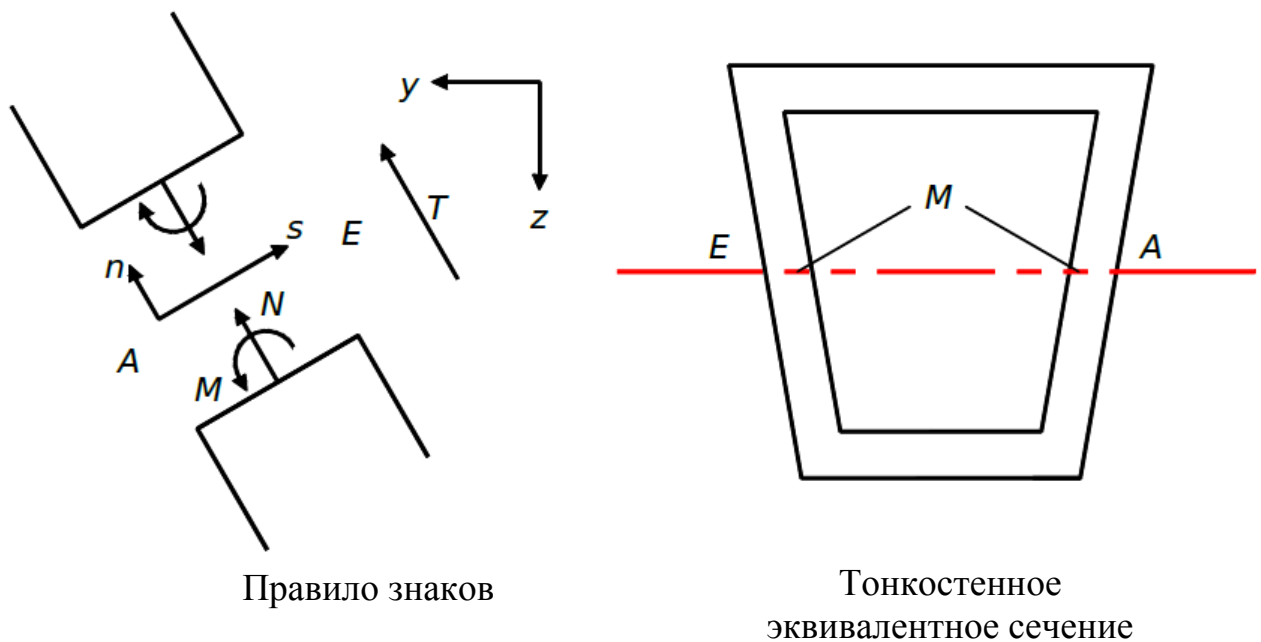


Рис. 3.49 – Определение знака плоскости сдвига

Плоскость сдвига может быть задана параллельно оси только с помощью параметров YB или ZB . В таких случаях символом S обозначается местоположение центра тяжести сечения.

Помимо этого, плоскость сдвига может быть задана в системе при помощи ввода нескольких сегментов, каждый из которых должен иметь один и тот же идентификационный номер NO , и состоять из двух точек с координатами (YB, ZB) и (YE, ZE) . Впоследствии каждый сегмент может обладать разными свойствами материала с учетом соединительной арматуры. Промежуточные сегменты, которые не оказывают никакого сдвигающего воздействия на какой-либо участок сечения, в систему не вводятся.

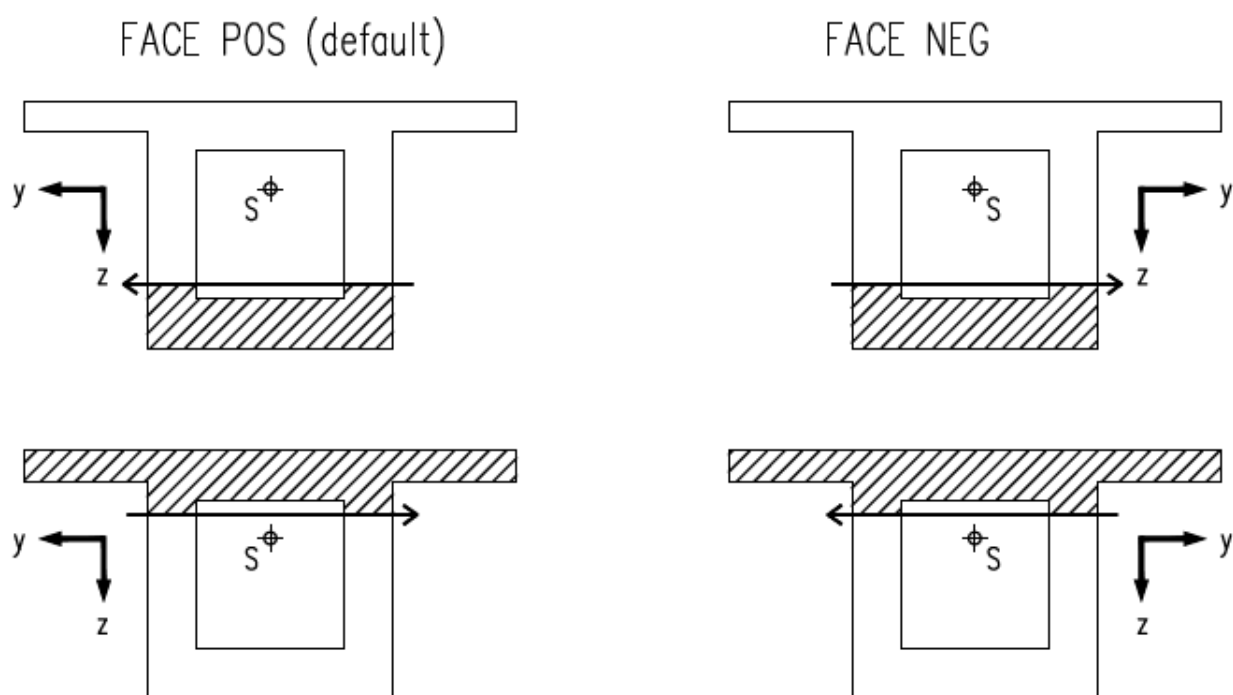


Рис. 3.50 – Плоскость сдвига в пределах горизонтальных элементов сечения

В этом случае необходимо соблюдать несколько дополнительных правил:

- Сдвигающее усилие всегда прикладывается к уже возведенной части сооружения (см. рисунки).

- Отделяемая часть сечения находится слева от сдвигаемого сегмента – *CTRL FACE POS* (по умолчанию), где лево/право ориентировано относительно линии *A-E* (см. рисунки).
- Отделяемая часть сечения находится справа от сдвигаемого сегмента – *CTRL FACE NEG*, где лево/право ориентировано относительно линии *A-E* (см. рисунки).
- Рекомендуется отделить более простую (основную) часть сечения. В отдельных участках сечения, так же как и во всех дополнительных участках, следует избегать попадания полостей или пустот. В программе они могут быть учтены по всем правилам, но только если они введены в систему в соответствующей (правильной в плане работы программы) последовательности.

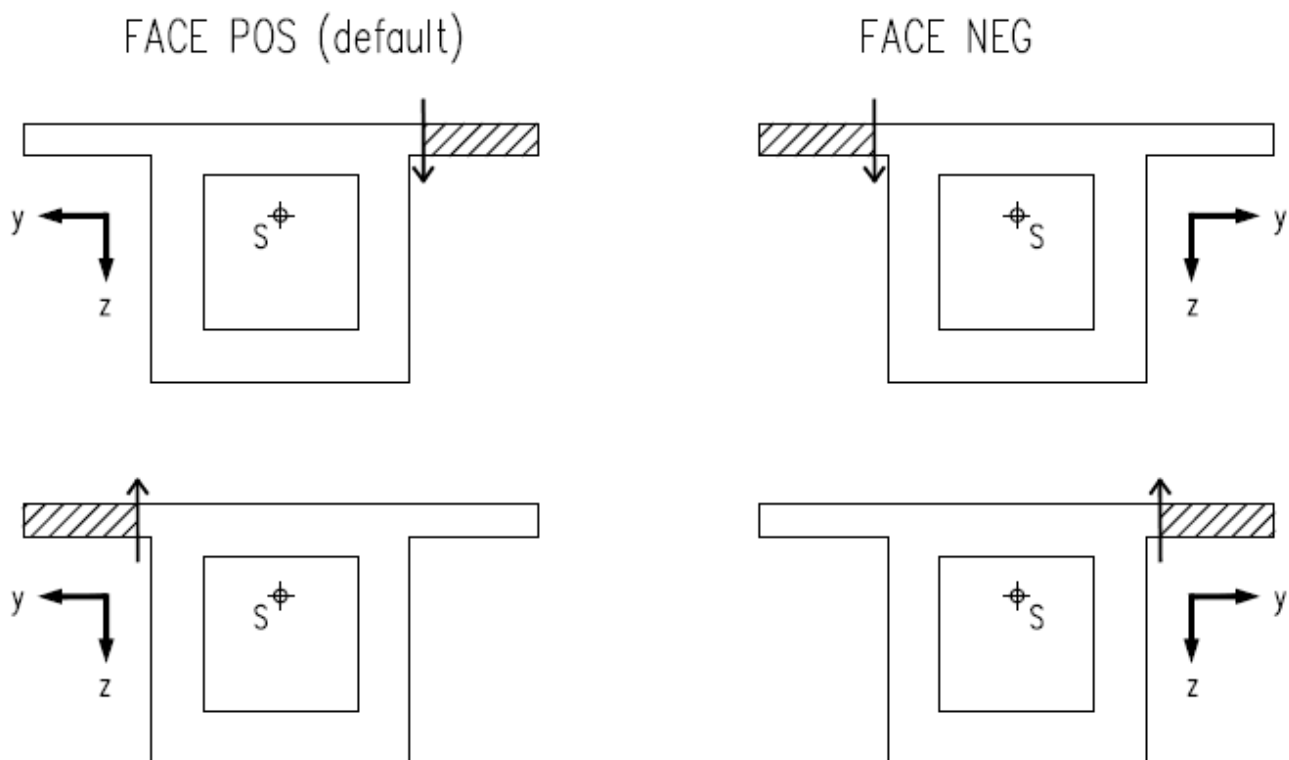


Рис. 3.51 – Плоскость сдвига в пределах консольных элементов сечения (полка)

Примечание: Все возможные варианты анализа влияния сдвигового усилия V_y на внутреннюю часть сечения, рассмотренные в данном руководстве, основаны на методах, изложенных в п.п. 2.8 (*CTRL STYP BEM 1/2/3* или следующие).

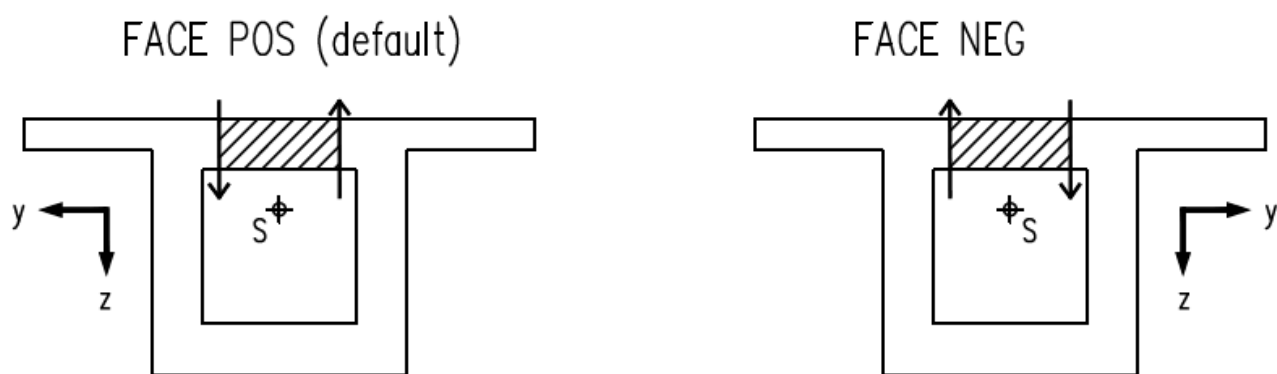


Рис. 3.51 - Плоскость сдвига в пределах внутренней (верхней) части сечения

Кроме того, для каждой отдельной кромки сечения пользователь может задать не только особые условия сопротивления кручению, но и коэффициент пропорциональности для сдвигающего усилия. Это позволяет охарактеризовать внешние штифтовые соединения, используемые в конструкции, уменьшенные ширины стенок сечения (плитных элементов), а также плоскости сдвига в многосвязных сечениях. Эти факторы и определяют часть общего сдвигового усилия $V \cdot S/I$, приложенного к участку сдвигаемой плоскости. Программа автоматически с использованием метода интегральных уравнений (*CTRL STYP BEM 1/2/3*) рассчитывает все эти факторы, исходя из сдвиговых напряжений, возникающих вдоль плоскости сдвига. При ручном вводе всех этих характеристик особую роль играет знак (“+” или “-”). Пользователь должен быть уверен, что сумма всех вводимых им значений равна 1.0. Если центр отдельного участка сечения имеет те же ординаты, что и центр всего сечения, то при расчете влияния сдвигового усилия метод сил не используется.

Параметр *BMAX* определяет, следует ли использовать эквивалентное поперечное сечение (например, для железобетонных поперечных сечений). Если ширина плоскости сдвига больше, чем значение параметра *BMAX*, распознанные программой участки плоскости сдвига автоматически разбиваются на два отдельных участка плоскости, каждый из которых прикладывается к внешнему габариту (ширине) эквивалентного полого сечения. Параметр ширины может

быть введен в систему в метрах, но его также можно задать и двумя другими способами:

EC2 Альтернативное обозначение ширины A/U в соответствии с *EC2*.

DIN Вписанная окружность рассчитывается исходя из площади и момента инерции сечения. Используется шестая часть диаметра.

По умолчанию значение *BMAX* для стальных или деревянных сечений и нескольких плоскостей сдвига – несколько вводов *CUT*, составляет 999. (без анализа влияния). Также данное значение характеризует и все остальные сечения, введенным в систему в соответствии с *EC2* или *DIN* (зависит от типа используемого материала). Увеличение этого значения приводит к уменьшению габаритов эквивалентного поперечного сечения, что, в результате, приводит к увеличению поперечного армирования с уменьшением значения сдвигового напряжения. Подбор поперечной арматуры, исходя из результатов анализа действия сдвигового усилия, выполняется только для подлинного или эквивалентного полого сечения.

Упругие напряжения будут рассчитываться с помощью выбранного метода – команда *CTRL STYP*. Для расчета в бетоне результирующих сдвиговых усилий используется интеграл напряжений.

Для учета влияния кручения пользователь может собственноручно ввести данное значение - параметр *WTM*. При использовании метода сил или граничных элементов (*CTRL STYP BEM 1*) это значение вводится в систему заранее и выражается через значение области Бредта (AK) – $1/(2 \cdot AK \cdot b)$. Консольные элементы или полки, которые не должны быть рассчитаны на кручение, должны характеризоваться параметром *WTM 0.0*.

Максимальные напряжения, возникающие в плоскости сдвига, в большинстве случаев носят информативный характер. Однако, при необходимости, данные значения могут быть введены пользователем самостоятельно при помощи команды *WTD*.

Эффективная ширина действия сдвигового усилия может быть уменьшена при помощи параметра *BRED*. Это применимо, например, когда не зацементированная полость в трубе влияет на прочностные свойства стенок, и, как следствие, ширину канала трубы необходимо уменьшить.

Усилия N и M , действующие перпендикулярно плоскости сдвига, используются только для расчета напряжений. Расчет прогиба и нормальных (осевых) усилий с учетом поперечного и продольного армирования не производится. Поэтому, исходя из значения растягивающего усилия, значение требуемой площади поперечного армирования может быть уменьшено, в то время как общая площадь армирования будет увеличена.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ!

В треснувшем состоянии арматура не проверяется на сдвиг только в том случае, если она располагается внутри отделенного многоугольного элемента сечения. В частности, участок сечения без арматуры характеризуется сдвиговым напряжением, равным 0.0, при условии, если он находится в растянутой зоне элемента! Поэтому в программе используются минимальные значения сдвиговых напряжений, которые характерны не разрушенному, в данном контексте без трещин, элементу с учетом коэффициента уменьшения, зависящего от значения силового рычага.

Отдельные сегменты одного сечения обрабатываются отдельно друг от друга в процессе расчета системы. Максимальное армирование в каждой отдельной плоскости сдвига, которая сохраняется для каждой отдельной схемы армирования, всегда анализируются программой как физическое сечение. При этом необходимо следовать некоторым правилам:

- Если плоскость сдвига пересекает несколько перегородок (стенок) сборного (составного) сечения, полученное армирование должно быть устроено в плоскости каждого, составляющего сечение, элемента. Общая площадь поперечного армирования должна быть увеличена в n раз, исходя из n количества перегородок сборного сечения.

- Если плоскость сдвига в компактном сечении дважды пересекает эквивалентное полая сечение, то двойное армирование устраивается в наиболее неблагоприятном, в плане работы, сегменте сечения. Это гарантирует, что при одновременном воздействии на элемент сдвигающего и скручивающего усилия, элемент будет отвечать всем прочностным требованиям, которые прописаны в некоторых нормативных документах.
- В свойства плоскостей сдвига, характеризующиеся одинаковым процентом поперечного армирования, должно быть введено максимальное значение армирования, полученное по результатам расчета. Это значение должно характеризовать каждый сегмент анализируемого сечения. Как пример, множество плоскостей сдвига может располагаться в пределах одной и той же перегородки (стенки) с одинаковым армированием по всей плоскости элемента.
- В свойства плоскостей сдвига, характеризующиеся различным процентом поперечного армирования, максимальное значение армирования должно быть введено для каждого отдельного сегмента сечения. Каждый отдельный сегмент с индивидуальным армированием должен характеризоваться индивидуальной схемой поперечного армирования. Как пример, когда в состав сечения входит несколько перегородок (стенок) с различным армированием.

Параметр *ASUP*, характеризующий минимальное армирование, может быть введен в систему в $[\text{см}^2/\text{м}]_{1021}$, в $[\text{см}^2/\text{м}^2]_{1022}$ или в виде коэффициента [-], который определяется исходя из длины и ширины плоскости сдвига (используется в большинстве нормативной документации). Если значение *ASUP* не введено в системе, то оно будет установлено по умолчанию исходя из выбранной нормативной документации. Если значение *ASUP* равно нулю, то программа будет стараться рассчитать систему без учета поперечного армирования (плиты и балочные элементы второстепенного значения). В особых случаях, в соответствии

с *DIN_EN 1992-1-1 9.5b* или *DIN 1045-1 13.2.3 (5)*, минимальное армирование элемента будет увеличено в 1.6 раза, и данная система будет анализироваться программой, как «сборное сечение с предварительно напряженными плитными элементами (полка, плита, консоль)», для которой при вводе значения *ASUP* необходимо определить параметр “*PFLA*”. Несмотря на то, что при решении некоторых задач, связанных с проектированием сооружения, необходимо различать минимальное и требуемое армирование, в расчетной системе необходимо указывать именно минимальное армирование.

Сдвиг в композитных поперечных сечениях

Следует уделить особое внимание при вводе плоскости сдвига в состав композитного поперечного сечения. Во-первых, плоскость сдвига прикладывается только к тем сегментам сечения, которые характеризуются одним и тем же материалом. Если сегмент сечения включает несколько материалов, то необходимо задать несколько плоскостей сдвига с одинаковым номером, но с разными номерами материалов. Также необходимо убедиться, что все области, не подверженные действию сдвига, объединены в пределах той стороны сечения, к которой и приложено сдвиговое усилие.

3.38 PANE – Элементы тонкостенного поперечного сечения

См. также: [SECT](#), [SPT](#), [Параметрические сечения](#), [Армирование](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение панельного элемента	<i>Lit4</i>	*
<i>YB</i>	Координаты начальной точки	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>YE</i>)
<i>ZB</i>	*По умолчанию: <i>YE</i> , <i>ZE</i> координаты последнего элемента	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>YA</i>)
<i>YE</i>	Координаты конечной точки	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>YB</i>)
<i>ZE</i>		[ММ] ₁₀₁₁	(<i>ZB</i>)
<i>T</i>	Толщина панели	[ММ] ₁₀₁₁	
<i>MNO</i>	Номер материала (композитные сечения)	-	(<i>SECT</i>)
<i>REFA</i>	Исходная начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDA</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSA</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>REFE</i>	Исходная конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDE</i>	Направляющая конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSE</i>	Исходные координаты типовых конечных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>R</i>	Радиус	мм	-
<i>PHI</i>	Максимальный угол закругления	град.	15
<i>OUT</i>	Точка выходы/выходная координата (больше не используется)	<i>LIT</i>	<i>MAE</i>
<i>FIXB</i>	Положение заземленной кромки от начала	*	*
<i>FIXE</i>	Положение заземленной кромки от конца	*	*
<i>TYPE</i>	Специальные параметры	<i>LIT</i>	-

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
	<i>NEFF</i> элемент не задействуется <i>NCHK</i> анализ напряжений не проводится <i>NNCH</i> оба параметра		
<i>AS</i>	Положительное (нижнее) армирование	$[\text{см}^2/\text{м}]_{1021}$	-
<i>ASMA</i>	Отрицательное (верхнее) армирование	$[\text{см}^2]_{1020}$	-
<i>LAY</i>	Слой армирования	<i>LIT</i>	0
<i>MRF</i>	Материал армирования	-	(<i>SECT</i>)
<i>TORS</i>	Кручение (см. п.п. 3.46) <i>PASS/ACTI/ADDI</i>	<i>LIT</i>	<i>ACTI</i>
<i>DAS</i>	Диаметр арматуры в зависимости от ширины раскрытия трещины	$[\text{мм}]_{1023}$	-
<i>A</i>	Расстояние между арматурными стержнями	$[\text{мм}]_{1011}$	1 [м]

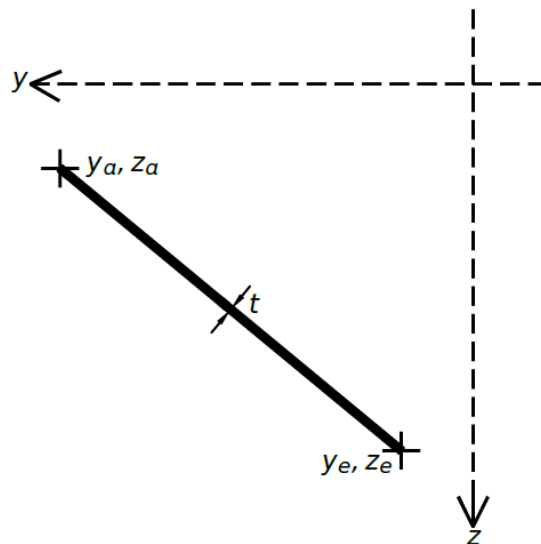


Рис. 3.52 – Элемент тонкостенного поперечного сечения

Равномерные нормальные и сдвиговые напряжения обычно распределяются по толщине тонкостенных элементов. Поэтому момент инерции относительно продольной оси (*A-E*) равен нулю. Однако сдвиговые напряжения, возникающие

при действии кручения, распределены линейно по толщине. Толщина также влияет и на распределение максимальных напряжений. Пересечение с элементами сечения *POLY* или *CIRC* в пределах анализируемого поперечного сечения не допускается.

Передача сдвига возможна только при обеспечении соединения (связи) между элементами сечения. Программа не распознает проникновения между тонкостенными элементами. При расчете сдвиговых напряжений элементы считаются взаимосвязанными между собой только тогда, когда разница между значениями координат точек привязки не превышает 0,5 мм (также привязку можно обеспечить при помощи команды *CTRL SCUT*).

Если параметр *NO* не определен в системе, то нумерация элементов будет осуществлена программой автоматически. Параметр *OUT* определяет, конкретно в каких точках элемента (середина *M*, начало *A*, конец *E*) будут отображены результаты расчета. (см. руководство по модулю *AQUA, AQB*).

Если задать параметр радиуса *R*, то в системе будут сгенерированы дополнительные прямые элементы, которые будут моделировать закругленную кромку (максимум 180°). Значение угла закругления устанавливается меньше, чем значение *PHI* (по умолчанию в системе введено *CTRL HMIN/HTOL*). Направление закругления определяется знаком *PHI* и соответствующим радиусом *R*. Положительные значения соответствуют дуге, которая огибает положительную ось *x*.

При расчете изгиба необходимо определить граничные условия (свободные, защемление) и объединить несколько плитных элементов в целую расчетную область. С учетом некоторых особенностей работы программы плитные элементы будут объединены, если:

- они должны располагаться в одной плоскости;
- не отличаться по толщине более чем в 1.25 раза (толщины могут быть изменены с помощью *CTRL FIXL*);
- все отличия, в плане их идентификаторов, должны располагаться в пределах 4-го символа;

- не обладать жесткостными характеристиками в конечных точках.

Жесткость формируется в результате пересечения всех плитных элементов под углом более 45° градусов. Длина плитных элементов не влияет на жесткость. По результатам расчета устойчивости точка прикрепления двух плитных элементов смещается внутрь толщи одного из плитных элементов.

Пользователь может самостоятельно ввести в систему плитный элемент с явными значениями координат начала и конца его закрепления, при этом необходимо соблюдать некоторые правила:

- параметр *FREE* характеризует незакрепленный конец элемента;
- положительные значения характеризуют связь (защемление) плитного элемента с внутренней стороны;
- отрицательные значения характеризуют связь (защемление) плитного элемента с внешней стороны. Эта функция необходима для описания расчетных областей, разделенных на отдельные плитные элементы;
- очень большие значения (больше чем длины плитных элементов) или параметр *OFF* останавливают анализ расчетной системы.

3.38 PLAT – Элементы тонкостенного поперечного сечения

См. также: *SECT, WELD, PROF, SPT*, Параметрические сечения

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение плитного элемента	<i>Lit4</i>	*
<i>YB</i>	Координаты начальной точки <i>A</i> относительно базовой системы координат	[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>ZB</i>		[ММ] ₁₀₁₁	*
	*По умолчанию: <i>YE, ZE</i> координаты последнего элемента		
<i>YE</i>	Координаты конечной точки <i>E</i>	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>YB</i>)
<i>ZE</i>	относительно базовой системы координат	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>ZB</i>)
<i>T</i>	Толщина плиты	[ММ] ₁₀₁₁	-
<i>MNO</i>	Номер материала (композитные сечения)	-	(<i>SECT</i>)
<i>REFA</i>	Исходная начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDA</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSA</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>REFE</i>	Исходная конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDE</i>	Направляющая конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSE</i>	Исходные координаты типовых конечных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>R</i>	Радиус	мм	-
<i>PHI</i>	Максимальный угол закругления	град.	15
<i>OUT</i>	Точка выходы/выходная координата (больше не используется)	<i>LIT</i>	<i>MAE</i>
<i>FIXB</i>	Положение заземленной кромки от начала	*	*
<i>FIXE</i>	Положение заземленной кромки от конца	*	*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>TYPE</i>	Специальные параметры <i>NEFF NEFF YZ</i> <i>NCHK</i> анализ напряжений не проводится <i>NNCH</i> оба параметра	<i>LIT</i>	-

Равномерные нормальные и сдвиговые напряжения обычно распределяются по толщине тонкостенных элементов. Поэтому момент инерции относительно продольной оси (*A-E*) равен нулю. Однако сдвиговые напряжения, возникающие при действии кручения, распределены линейно по толщине. Толщина также влияет и на распределение максимальных напряжений. Пересечение с элементами сечения *POLY* или *CIRC* в пределах анализируемого поперечного сечения не допускается. Разрешено пересечение с элементами сечения *PROF* или *WELD*, но *PROF* должен быть введен в систему как тонкостенные элементы.

Передача сдвига возможна только при обеспечении соединения (связи) между элементами сечения. Программа не распознает проникновения между тонкостенными элементами. При расчете сдвиговых напряжений элементы считаются взаимосвязанными между собой только тогда, когда разница между значениями координат точек привязки не превышает 0,5 мм (также привязку можно обеспечить при помощи команды *CTRL SCUT*).

Если параметр *NO* не определен в системе, то нумерация элементов будет осуществлена программой автоматически. Параметр *OUT* определяет, конкретно в каких точках элемента (середина *M*, начало *A*, конец *E*) будут отображены результаты расчета. (см. руководство по модулю *AQUA, AQB*).

Если задать параметр радиуса *R*, то в системе будут сгенерированы дополнительные прямые элементы, которые будут моделировать закругленную кромку (максимум 180°). Значение угла закругления устанавливается меньше, чем значение *PHI* (по умолчанию в системе введено *CTRL HMIN/HTOL*). Направление

закругление определяется знаком RHI и соответствующим радиусом R . Положительные значения соответствуют дуге, которая огибает положительную ось x .

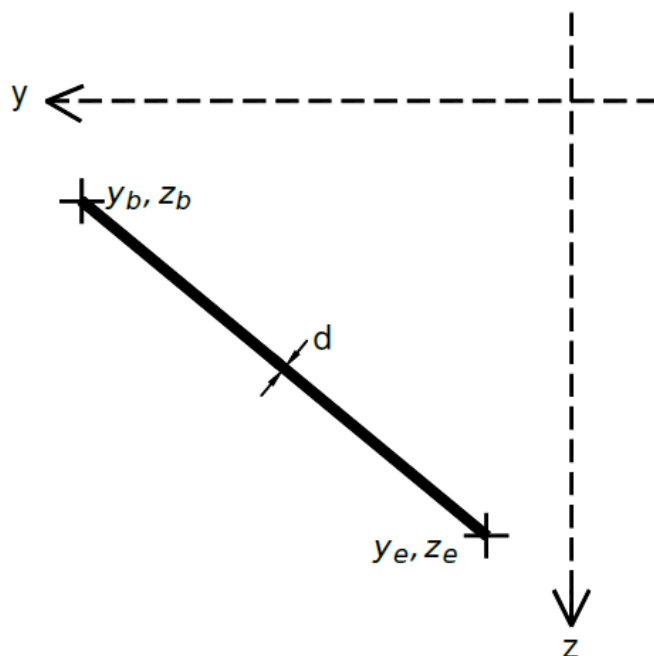


Рис. 3.53 - Элемент тонкостенного поперечного сечения

При расчете изгиба (c/t , класс сечений 4) необходимо знать эффективную (расчетную) длину c . Это значение устанавливается для каждого плитного элемента в зависимости от положения точек закрепления (защемления), которые вводятся в расчетную систему по следующим правилам:

- параметр $FREE$ характеризует незакрепленный конец элемента;
- положительные значения характеризуют связь (защемление) плитного элемента с внутренней стороны;
- отрицательные значения характеризуют связь (защемление) плитного элемента с внешней стороны. Эта функция необходима для описания расчетных областей, разделенных на отдельные плитные элементы;
- очень большие значения (больше чем длины плитных элементов) или параметр OFF останавливают анализ расчетной системы.

PLAT "1011" -250 0 -210 0 T 10 FIXA +0 FIXE -460

PLAT "1012" -210 0 +210 0 T 10 FIXA -40 FIXE -40

PLAT "1013" +210 0 +250 0 T 10 FIXA -460 FIXE +0

Если пользователь не ввел в систему значения необходимых расстояний, то при соблюдении определенных условий, программа будет пытаться подобрать необходимые условия закрепления (защемления) и объединять идущие друг за другом плитные элементы в одну расчетную область:

- элементы должны быть соединены и не иметь прогибов;
- не отличаться по толщине более чем в 1.25 раза (толщины могут быть изменены с помощью *CTRL FIXL*);
- все отличия, в плане их идентификаторов, должны располагаться в пределах 4-го символа;
- не обладать жесткостными характеристиками в конечных точках. Жесткость формируется в результате пересечения всех плитных элементов под углом более 45° градусов. Длина плитных элементов не влияет на жесткость. По результатам расчета устойчивости точка прикрепления двух плитных элементов смещается внутрь толщи одного из плитных элементов.

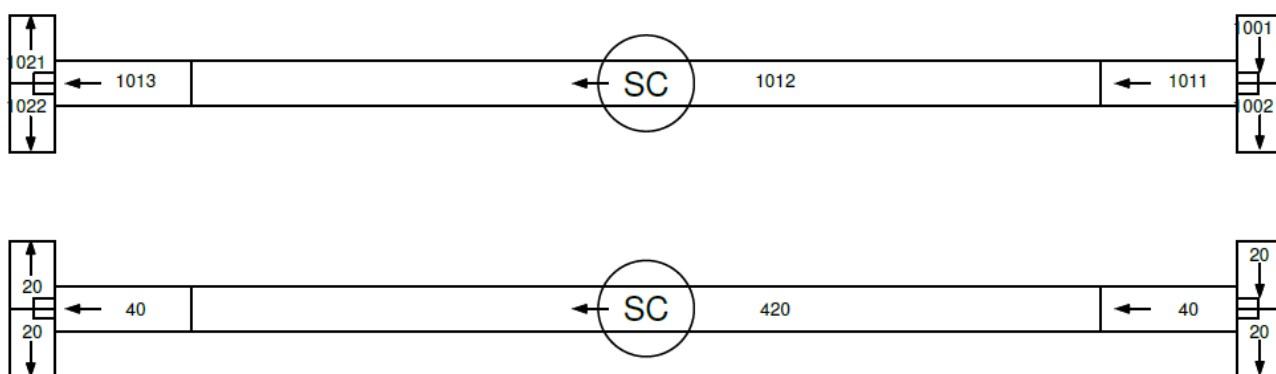


Рис. 3.54 – Определение условий прикрепление отдельных расчетных областей

3.40 WELD – Сварное соединение, работающее на сдвиг

См. также: *SECT, PANE, PLAT, PROF*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение элемента	<i>Lit4</i>	*
<i>YB</i>	Координаты начальной точки	[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>ZB</i>	относительно базовой системы координат	[ММ] ₁₀₁₁	*
	*По умолчанию: <i>YE, ZE</i> координаты последнего элемента		
<i>YE</i>	Координаты конечной точки	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>YB</i>)
<i>ZE</i>	относительно базовой системы координат	[ММ] ₁₀₁₁	(<i>ZB</i>)
<i>T</i>	Расчетная толщина	[ММ] ₁₀₁₁	-
<i>MNO</i>	Номер материала (композитные сечения)	-	(<i>SECT</i>)
<i>REFA</i>	Исходная начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDA</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSA</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>REFE</i>	Исходная конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDE</i>	Направляющая конечная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSE</i>	Исходные координаты типовых конечных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-

Данным элементом обычно соединяют тонкостенные элементы сечения *PLAT* и *PROF*, устойчивые к сдвигу, не влияя при этом на значения прогиба и нормального (осевого) усилия. С учетом этого можно выделить несколько примеров использования такого соединения:

- Продольные сварные швы ($T > 0$)
- Изогнутая область в тонкостенных сечениях ($T > 0$)
- Сопротивление сдвигу в композитных сечениях ($T < 0$)

– Скрепленные перегородки ($T < 0$)

Для реальных сварных швов должна использоваться эквивалентная толщина шва T . В дальнейшем сваренный элемент используется для расчета сдвиговых напряжений в сварных швах. Использование другого номера материала, который не введен в состав анализируемого сечения, не допускается.

Расчетная толщина сварного шва T для скрепления между собой перегородок определяется через жесткость сдвига S_{id} рамы, разделенная на произведение модуля сдвига $WELD$ и длину соединения, работающего на сдвиг, в плоскости сечения – $T = S_{id} / (G \cdot L)$.

Если параметр NO не определен в системе, то нумерация элементов будет осуществлена программой автоматически.

При расчете сдвиговых напряжений элементы считаются взаимосвязанными между собой только тогда, когда разница между значениями координат точек привязки не превышает 0,5 мм (также привязку можно обеспечить при помощи команды *CTRL SCUT*).

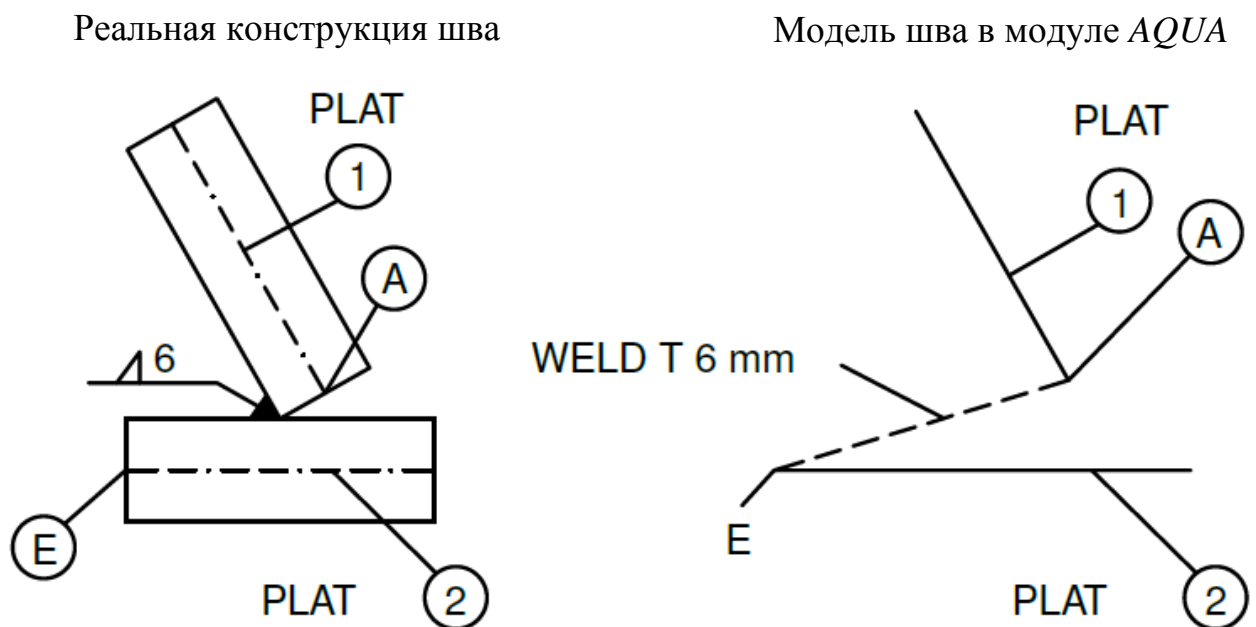


Рис. 3.55 – Дискретизация продольного сварного шва в AQUA

3.41 PROF – Прокатные металлические элементы

См. также: [SECT](#), [PLAT](#), [WELD](#), [SPT](#), [Параметрические сечения](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер сечения	<i>Lit4</i>	*
<i>TYPE</i>	Тип профиля сечения (см. ниже)	<i>LIT</i>	<i>IPE</i>
<i>Z1</i>	Идентификатор профиля	*	*
<i>Z2</i>	Дополнительный идентификатор профиля	*	-
<i>Z3</i>	Дополнительный идентификатор профиля	*	-
<i>MNO</i>	Номер материала профиля	-	(<i>SECT</i>)
<i>ALPH</i>	Угол поворота вокруг точки привязки	град.	0
<i>YM</i>	Координаты точки привязки	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>ZM</i>		[мм] ₁₀₁₁	0
<i>REFP</i>	Точка привязки всего сечения профиля	<i>Lit8</i>	-
<i>REFD</i>	Полярная координата точки привязки	<i>Lit8</i>	-
<i>REFS</i>	Исходные координаты типовых конечных точек (см. Также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>REFR</i>	Точка привязки для ввода кручения	<i>Lit4</i>	-
<i>DTYP</i>	Обозначения <i>T</i> Тонкостенное сечение <i>S</i> Сплошное сечение <i>TP</i> Сечение <i>T</i> с положительным значением ординаты <i>z</i> <i>SP</i> Сечение <i>S</i> с положительным значением ординаты <i>z</i> <i>TABT</i> Сечение <i>T</i> из сортамента (урезанный функционал) <i>TABS</i> Сечение <i>S</i> из сортамента (урезанный функционал)	-	<i>S</i>

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>SYM</i>	<p>Функции симметрии</p> <p><i>o-o</i> симметричное дублирование элемента относительно пользовательской точки/оси</p> <p><i>y-y --/--</i> относительно оси <i>y</i></p> <p><i>z-z --/--</i> относительно оси <i>z</i></p> <p><i>QUAD</i> четыре элемента (все три функции симметрии)</p> <p><i>YFLP</i> точное отзеркаливание относительно оси <i>y</i></p> <p><i>ZFLP</i> точное отзеркаливание относительно оси <i>z</i></p>	<i>LIT</i>	-
<i>REF</i>	<p>Расположение точки привязки сечения</p> <p><i>C</i> Центр жесткости/упругости</p> <p><i>SC</i> Центр сдвига</p> <p><i>Y+Z-/Y-Z-/Z-</i> Сверху справа/слева/центр</p> <p><i>Y+/Y-/M</i> По центру справа/слева/центр</p> <p><i>Y+Z+/Y-Z+/Z+</i> Снизу справа/слева/центр</p>	<i>LIT</i>	*
<i>MATI</i>	Материал заполнения для полых сечений	-	0
<i>VD</i>	Явное значение высоты <i>D</i>	*	
<i>VB</i>	Явное значение ширины <i>B</i>	*	
<i>VS</i>	Явное значение толщины перегородок/стенок <i>S</i>	*	
<i>VT</i>	Явное значение толщины пояса/полок <i>T</i>	*	
<i>VR1</i>	Явное значение радиуса закругления <i>R1</i>	*	

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>VR2</i>	Явное значение радиуса закругления <i>R2</i>	*	
<i>VB2</i>	Явное значение ширины нижней части сечения <i>B2</i>	*	
<i>VT2</i>	Явное значение ширины нижнего пояса/полки <i>T2</i> (все размеры указаны в единицах, которые определяются исходя из выбранного типа сечения профиля)	*	
<i>CW</i>	Ветровой коэффициент <i>DIN</i> подробное описание в <i>DIN</i> <i>ЕС</i> упрощенное значение в Еврокоде	<i>LIT</i>	*
<i>BCYZ</i>	Ввод кривой функции роста напряжений при продольном изгибе (см. команду <i>SECT</i>)	<i>LIT</i>	*

Команда *PROF* может быть введена без предварительного ввода команды *SECT*. В этом случае будет сформировано сечение с заданным номером *NO*. Если лицензия к модулю *AQUA* не доступна или если сечение введено в систему при помощи *DTYP* (см. таблицу выше), то программой генерируется сечение с ограниченным набором свойств (ограниченный функционал *AQUA*). Это, в частности, касается:

- момент инерции при кручении;
- область деформаций сдвига;
- депланация при кручении;
- значения возникающих напряжений не анализируются.

Шпунтовые, круглые и прямоугольного сечения сваи всегда будут обрабатываться по упрощенной методике *AQUA*.

Фактический список используемых профилей может быть составлен при не завершеном вводе данных в систему. Если ничего не вводить в систему, пользователь получит список возможных профилей, если же ввести тип профиля, пользователь получит список всех профилей заданного типа, если ввести только часть идентификатора, пользователь получит набор профилей с одинаковыми идентификаторами.

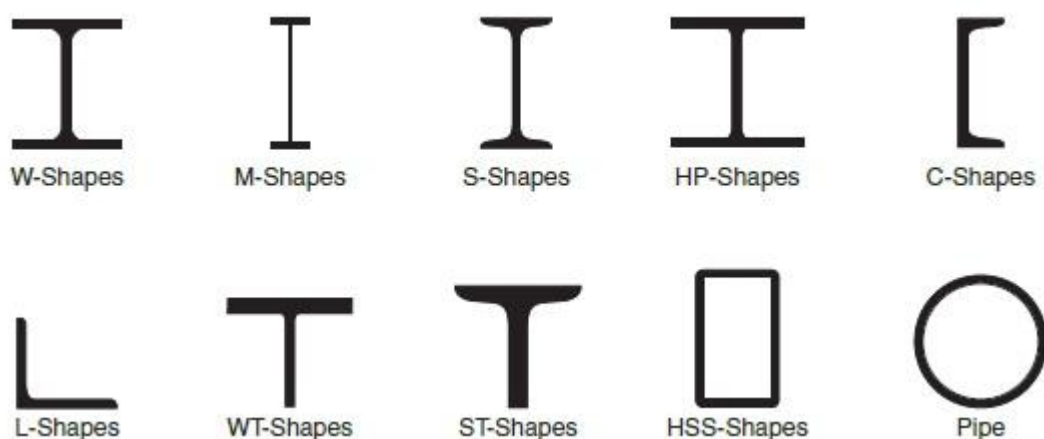


Рис. 3.56 – Обозначения профилей в зарубежной нормативной документации

Европейский сортамент используемых профилей		Пример
<i>I</i>	Двутавровая балка с наклонными поясами <i>DIN 1025</i> Табл. 1 от <i>I 80</i> до <i>I 600</i>	<i>I 300</i>
<i>IPE</i>	Двутавровая балка с параллельными поясами <i>DIN 1025</i> Табл. 5 от <i>IPE 80</i> до <i>IPE 600</i>	<i>IPE 270</i>
<i>HE</i>	Европейский профиль с параллельными поясами	<i>HE 300 M</i> <i>HE 300 B</i> <i>HE 400 299</i>
<i>HEAA</i>	максимально облегченное сечение	<i>HEAA 200</i>
Европейский сортамент используемых профилей		Пример
<i>HEA</i>	Широкополочная балка двутаврового сечения, облегченное сечение	<i>HEA 300</i>
<i>HEB</i>	Широкополочная балка двутаврового сечения	<i>HEB 200</i>

	сечения, нормальное сечение	
<i>HEM</i>	Широкополочная балка двутаврового сечения, тяжелое сечение	<i>HEM 600</i>
<i>HSL</i>	Максимально облегченное сечение	<i>HSL 100</i>
<i>HD</i>	Профиля с толстыми стенками	<i>HD 320 97.6</i>
<i>HL</i>	Специальные крупноразмерные сечения	<i>HL 1000 AA</i>
<i>HP</i>	Профиля с равномерными толстыми стенками	<i>HP 220 57.2</i>
<i>U</i>	Швеллер с наклонными полками (<i>DIN 1026</i>)	<i>U 300</i>
<i>UPE</i>	Швеллер с параллельными полками	<i>UPE 100</i>
<i>UAP</i>	Швеллер производства <i>Arbed Saarstahl</i>	<i>UAP 200</i>
<i>T</i>	Тавровое сечение с наклонной стенкой/полкой	<i>T 80</i>
<i>TB</i>	Тавровое утяжеленное сечение	<i>TB 60</i>
<i>Z</i>	Зубчатое или <i>Z</i> -образное сечение (<i>Z-shape</i>) в соответствии с <i>DIN 1027</i>	<i>Z 100</i>
<i>L</i>	Горячекатаное уголковое сечение, используются все идентификаторы Толщина равнополочного уголка Толщина неравнополочного уголка	<i>L 20 3</i> <i>L 90 60 8</i>
<i>CDL</i>	Холоднокатаное уголковое сечение, используются все идентификаторы	
<i>SH</i>	Горячекатаное полое сечение (<i>EN 10210-2</i>)	
<i>SHC</i>	Холоднокатаное полое сечение (<i>EN 10219-2</i>) используются все идентификаторы ширина <i>x</i> высота (от 20 до 600) толщина стенок сечения	

Примечание: существуют различные варианты сечений с разными радиусами закругления. При необходимости, пользователь может ввести параметры *VR1* и *VR2*

<i>BAR</i>	Круглая стержневая арматура по <i>EN 10060</i>	<i>BAR 100</i>
<i>WARM</i>	Трубы горячего производства (<i>EN 10210</i>)	<i>WARM 711 8.0</i>
<i>COLD</i>	Трубы холодного производства (<i>EN 10219</i>)	<i>COLD 711 8.0</i>
<i>CDS</i>	Профиль холодного производства (<i>EN 10162</i>)	<i>CDS 100 80 6</i>
<i>BARQ</i>	Квадратная стержневая арматуры (<i>EN 10059</i>)	<i>BARQ 100</i>
<i>BARF</i>	Плоская стержневая арматура (<i>EN 10058</i>)	<i>BARF 100 10</i>

Международный сортамент используемых профилей		Пример
<i>UB</i>	Универсальный балочный профиль из стали британского производства	3 идентификатора
<i>UC</i>	Универсальный профиль колонн из стали британского производства	3 идентификатора
<i>UBP</i>	Универсальная несущая свая	3 идентификатора
<i>RSJ</i>	Балка, брус, стропило	3 идентификатора
<i>W</i>	Широкополочный двутавр американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	2 идентификатора
<i>WT</i>	Уменьшенный вполовину широкополочный двутавр	2 идентификатора
<i>M</i>	Многорребристый профиль (<i>M-shape</i>) американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	2 идентификатора
<i>MT</i>	Уменьшенный вполовину многорребристый профиль	2 идентификатора
<i>S</i>	<i>S</i> -образный профиль (<i>S-shape</i>) американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	2 идентификатора
<i>ST</i>	Уменьшенный вполовину <i>S</i> -образный профиль	2 идентификатора
<i>HPus</i>	<i>HP</i> профиль (<i>HP-shape</i>) американского	2 идентификатора

	производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	
<i>C_us</i>	Швеллер американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	2 идентификатора
<i>MCus</i>	Швеллера различного назначения американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	2 идентификатора
<i>L_us</i>	Угловой профиль американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	3 идентификатора
<i>HSS</i>	Прямоугольный полый профиль американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	3 идентификатора
<i>HSSr</i>	Профиль круглого сечения (труба) американского производства (американские единицы измерения, <i>AISC</i>)	2 идентификатора
<i>JIS</i>	Японские профили	3 идентификатора
<i>MBis</i>	Двутавровый профиль (<i>MB-shapes</i>)	1 (2) идентификатора
<i>HBis</i>	Двутавровый профиль (<i>ISHB-shapes</i>)	1 идентификатора
<i>MCis</i>	Индийские швеллера (<i>MC-shapes</i>)	1 идентификатора
<i>L_is</i>	Индийский угловой профиль	3 идентификатора
Австралийский/Новозеландский сортамент профилей (<i>AS/NZS 4600</i>)		Пример
<i>UBas</i>	Двутавровый профиль <i>UB</i>	2 характеристики
<i>UCas</i>	Двутавровый профиль <i>UC</i>	2 характеристики
<i>UBPas</i>	Двутавровый профиль <i>UBP</i>	2 характеристики
<i>PFCas</i>	Швеллерный профиль <i>PFC</i>	1 характеристики

<i>L_as</i>	Угловые профили <i>EA</i> и <i>UA</i> Значения толщин полок уголка является фактическим!	2 или 3 характеристики
<i>SHas</i>	Полые профили (труба) <i>SHS</i> и <i>RHS</i>	3 характеристики
<i>CCas</i>	Холоднокатаный швеллерный профиль <i>CC</i>	3 характеристики
<i>CAas</i>	Холоднокатаный угловой профиль <i>CA</i>	3 характеристики
<i>GOST</i>	Двутавровый профиль (ГОСТ 8239) Гнутый двутавровый профиль с параллельными полками (ГОСТ 26020) Колонный двутавровый профиль с параллельными полками (ГОСТ 26020) Высокопрочный двутавровый профиль с параллельными полками (ГОСТ 26020)	<i>GOST 30</i> <i>GOST 12 B 2</i> <i>GOST 30 K 3</i> <i>GOST 45 S 2</i>
<i>U_gost</i>	Швеллер (ГОСТ 8240) Швеллер с параллельными полками (ГОСТ 8240)	<i>U_GO 30</i> <i>U_GO 30 P</i>
<i>L_gost</i>	Угловой профиль (ГОСТ 8509/8510)	<i>L_GO 60 60 8</i>
	Сортамент шпунтовых свай (шпунт) (См. параметр <i>SYM</i> для создания в расчетной системе одиночной шпунтовой сваи или шпунтовой стенки)	Пример
<i>LARS</i>	Шпунт Ларсена U-образного сечения с закругленными краями от производителя «Hoesch»	<i>HOES 1705</i>
<i>AU</i>	Шпунтовые сваи <i>Arbed/Arcelor</i>	<i>AU 17</i>
<i>PAL</i>	Холоднодеформированный шпунт <i>Arcelor</i> U-образного сечения	<i>PAL 31 40</i>

<i>PAU</i>	Холоднодеформированный шпунт <i>Arcelor U-</i>	<i>PAU 24 5.</i>
	образного сечения	
<i>PU</i>	Шпунт U-образного сечения	<i>PU 12</i>
		<i>L 3S / JSP 3</i>
<i>HOES</i>	Шпунт Z-образного сечения от производителя « <i>Hoesch</i> »	<i>HOES 1705</i>
<i>AZ</i>	Шпунт Z-образного сечения <i>Arbed</i>	<i>AZ 28</i>
<i>PAZ</i>	Холоднодеформированный шпунт <i>Arcelor Z-</i>	<i>PAZ 55 70</i>
	образного сечения	
<i>PZ</i>	Шпунт Z-образного сечения от производителя « <i>Skyline Steel</i> »	<i>PZ 35</i>

Профильные сечения, в первую очередь, анализируются программой, как нормированные геометрические элементы. Сечения ненормированной геометрии могут быть введены в расчетную схему при помощи параметров с литерой *V* (от *VD* до *VR2*). В любом случае пользователю необходимо задать исходный тип профиля и значения для требуемых идентификаторов. Если пользователь введет не табличные идентификаторы (например, *HEM 172*), все значения, характеризующие габариты сечения, должны быть также введены пользователем.

Холоднокатаные профиля (*CDS*) могут быть введены в расчетную схему как *U*, *Z*, *C* или *OMEGA* профильные сечения (элементы), при этом необходимо ввести положительное значение для параметра *B* (ширина) и/или *T* (длина полки):

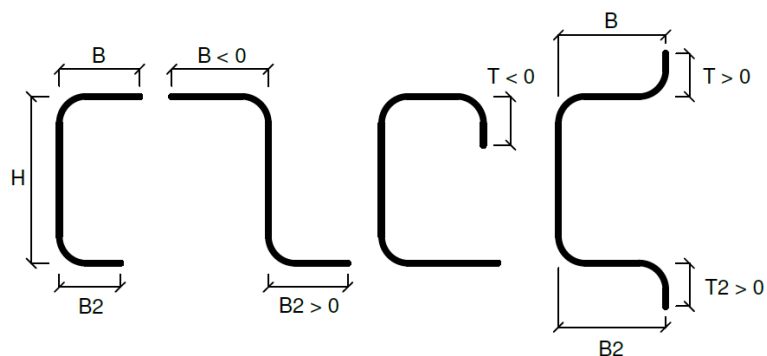


Рис. 3.57 – Холоднокатаный профиль

Данный ввод (параметры $VD - VR2$) характеризует только многоугольные или тонкостенные элементы сечения, а не какие-либо другие сечения с постоянными свойствами (сортамент). С учетом этого, результаты анализа тонкостенных сечений немного отличаются от значений, полученных в результате анализа сечений из сортамента. При вводе действия кручения для сечений с очень тонкими элементами и со значительными закруглениями, могут возникать более серьезные отклонения в результатах анализа. По умолчанию, если в составе анализируемого поперечного сечения $DTYP$ уже был задан тонкостенный элемент, то изменяется только значение параметра T . Если профильный элемент (сечение) включен (частично или полностью) в состав бетонного элемента, например плиты, то все отверстия, которые входят в состав бетонного элемента, будут созданы программой автоматически, при условии, если параметр $MREF$ не введен в расчетную схему со значением 0.

Если параметр NO не введен в расчетную схему, то все элементы нумеруются программой автоматически.

По умолчанию профильные элементы (рис. 3.58) ориентированы в системе координат $y-z$ таким образом, что ось y характеризуется большим моментом инерции. Швеллера (U -shape) и уголки (L -shape) ориентированы таким образом, как показано на рисунке 3.58. Габариты уголка определяются значениями параметров $Z1$ (высота) и $Z2$ (ширина), но значения могут быть взаимозаменяемы. При помощи параметра $ALPH$ для поперечного сечения можно задать вращение вокруг оси x . Когда значение для параметра REF не задано, точка привязки элемента (YM, ZM) будет расположена: для двутаврового и полого профиля в центре тяжести (рис. 3.58); для швеллерного профиля слева на внешней кромке посередине (рис. 3.58), для уголкового профиля внизу слева для уголкового профиля; для таврового профиля посередине верхней кромки.

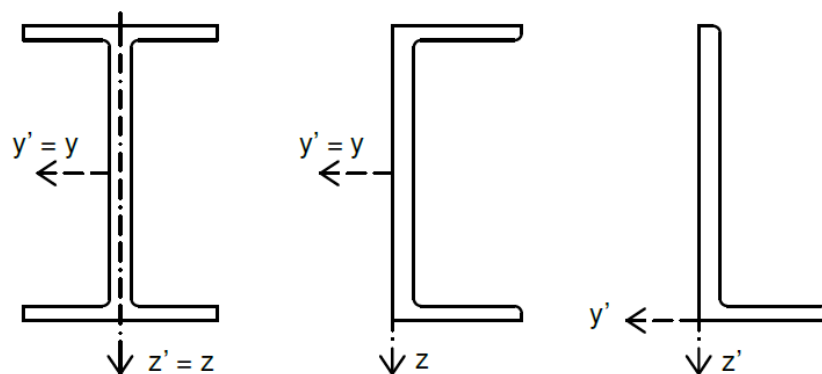


Рис. 3.58 – Ориентирование профильных элементов и расположение точек привязки

Координаты этих точек привязки и угол поворота могут быть введены в расчетную схему относительно других точек, но сам профиль и его размеры могут, конечно, не зависеть от этих опорных точек. Профильные элементы могут быть соединены с другими элементами поперечного сечения, но тогда соединяемые элементы должны соответствовать друг другу. Так, например, тонкостенные элементы (*PANE*, *PLAT*, *WELD*) могут быть объединены только с профильными элементами *DTYP D*, в то время как толстостенные элементы допускается объединять с профильными элементами *DTYP V*. При наложении одного такого материала на другой в расчетной схеме будут автоматически генерироваться пустоты. И нужно иметь в виду, что прикладывание поперечных усилий в тонкостенных сечениях возможно только в концах, вершинах или в центральной точке (двутавр и швеллер). В случае ввода в расчетную схему сплошных сечений необходимо, чтобы кромки элемента располагались точно друг над другом. Как можно видеть в следующем примере, разделенные надвое профильные элементы должны быть прикреплены (привязаны) к внешней кромке (стенки или полки) другого профильного элемента.

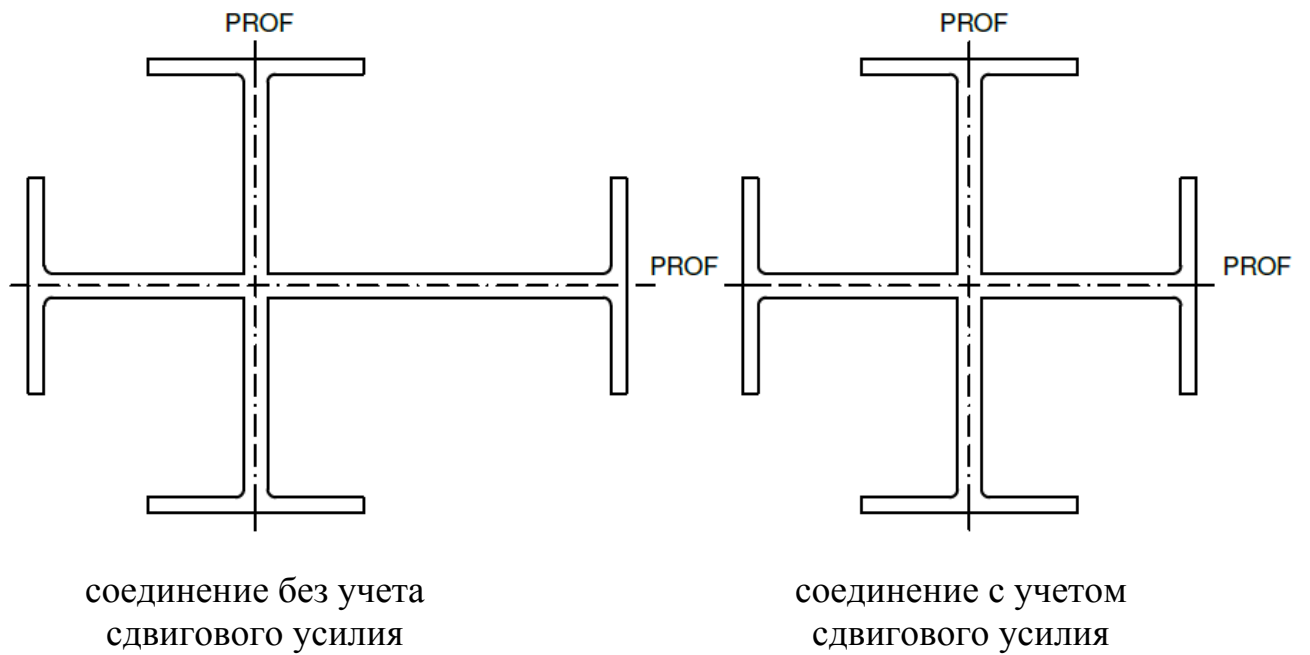


Рис. 3.59 – Передача сдвигового усилия

Тонкостенный профильный элемент

- а) Крестообразный профильный элемент, выполненный из четырех половинчатых элементов двутавровых балок *HEB 400*

SECT 1

PROF 101 HEB 400 ALPH 0 DTYP T

PROF 102 HEB 400 ALPH 90 DTYP T

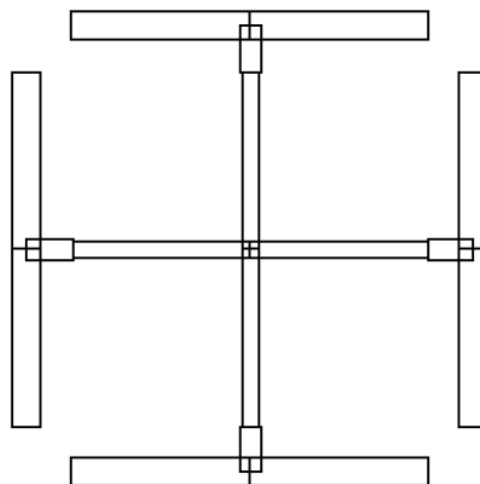


Рис. 3.60 – Крестообразный профильный элемент, выполненный из четырех разделенных пополам двутавровых балок *HEB 400*

b) Крестообразный профильный элемент, выполненный из двух половинчатых элементов двутавровой балки HEA 300

SECT 1

PROF 101 HEA 300 ZM -145 DTYP TP ALPH 180.

PROF 102 HEA 300 ZM 145 DTYP TP

WELD 200 150 -7 150 7 14

200 -150 -7 -150 7 =

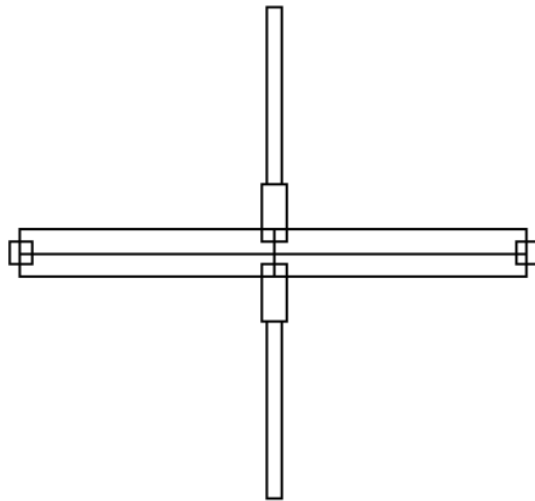


Рис. 3.61 – Крестообразный профильный элемент, выполненный из двух половинчатых элементов двутавровой балки HEA 300

c) Две трубы 216/3.6 скрепленные двумя 4 мм пластинами

SECT 1

PLAT 101 120 -106.2 120 106.2 3.6 R -106.2

PLAT 101 120 106.2 120 -106.2 3.6 R -106.2

PLAT 102 -120 -106.2 -120 106.2 3.6 R -106.2

PLAT 102 -120 106.2 -120 -106.2 3.6 R -106.2

PLAT 201 120 -110 -120 -110 4.0

PLAT 202 120 110 -120 110 =

!Соединение

```
WELD 300 120 110 120 106.2 6.0
      300 -120 110 -120 106.2 =
      300 120 -110 120 -106.2 =
      300 -120 -110 -120 -106.2 =
```

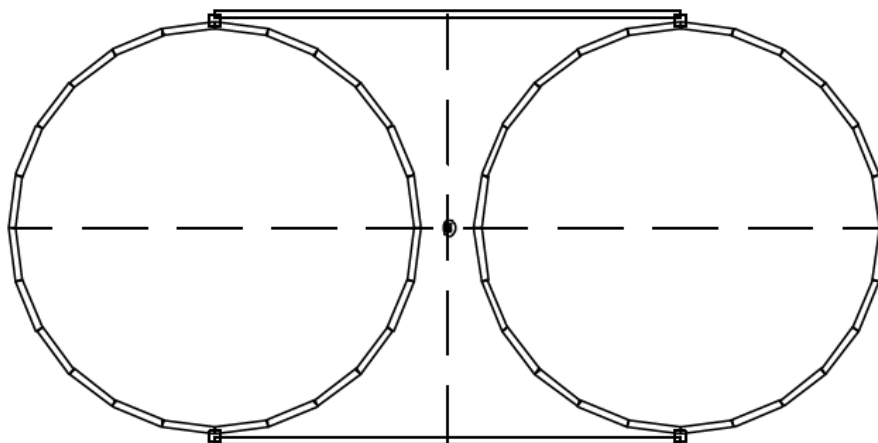


Рис. 3.62 – Составное сечение из двух труб

Для комбинации сплошных многоугольных элементов необходимо убедиться, что многоугольные элементы полностью выровнены друг относительно друга вдоль собственных кромок (граней), чтобы была возможность учесть влияние сдвигового усилия (рис. 3.59). Для ввода в расчетную схему следующего составного сечения (рис. 3.63) необходимо указать точные значения координат и высот разделенной двутавровой балки *HEM 1000*:

SECT 2 TITLE "Двойной крестообразный профильный элемент"

```
PROF 10 HEM 1000 ALPH 0 YM 0.0 ZM 0.0 DTYP S
PROF 11 HEM 1000 ALPH 90 YM +10.5 ZM 0.0 DTYP SP VD 1008-21
PROF 12 HEM 1000 ALPH 270 YM -10.5 ZM 0.0 DTYP SP VD 1008-21
PROF 13 HEM 500 ALPH 0 YM 0.0 ZM -504.0 DTYP SP
PROF 14 HEM 500 ALPH 180 YM 0.0 ZM 504.0 DTYP SP
PROF 15 HEM 500 ALPH 90 YM 504.0 ZM 0.0 DTYP SP
PROF 16 HEM 500 ALPH -90 YM -504.0 ZM 0.0 DTYP SP
```

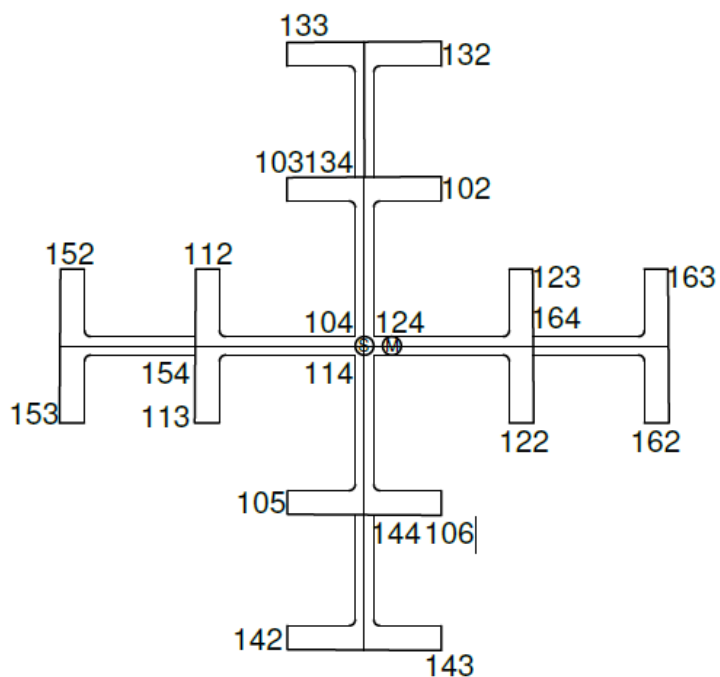


Рис. 3.63 – Двойной крестообразный профильный элемент

Конкретный профильный элемент отзеркаливается три раза с помощью команды *SYM QUAD*. С помощью последовательности команд:

`PROF 101 L 50 50 8 YM 10 ZM 10 DTYP T SYM QUAD`

в расчетную схему можно ввести поперечное сечение, состоящее из четырех уголковых профильных элементов L 50x50x8 (рис. 3.64).

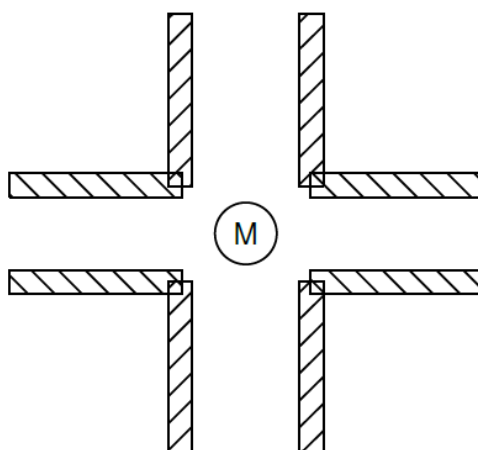


Рис. 3.64 – Составное или комбинированное поперечное сечение

Примечания, касаемые шпунтовых свай:

Геометрию профильных элементов, используемых в качестве шпунтовых свай, можно моделировать лишь приближенно. Важнейшими характеристиками таких элементов являются вес одной сваи $Z3$ (кг/м) и еще несколько параметров. Модуль *AQUA* создаст замковое соединение между элементами в виде эквивалентных сплошных сегментов (сечений), исходя из общей площади всех элементов и их плотности 7850 кг/м^3 . Параметр *R1* характеризует радиус закругления замка (только U-образной формы), *R2* – угол закругления полки шпунта относительно горизонтальной стенки, а *B2* может использоваться для ввода в расчетную схему параметра ширины «верхнего» пояса шпунта. Для шпунтовых свай параметр *SYM* характеризуется:

none одиночная свая

z-z шпунтовая стенка шириной 1 м (замки не скреплены)

o-o шпунтовая стенка шириной 1 м (замки скреплены, только шпунт U-образного сечения)

3.42 SPT – Геометрия сечения и концентраторы напряжений

См. также: [SECT](#), [POLY](#), [Параметрические сечения](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение точки (концентратора)	<i>Lit4</i>	*
<i>Y</i>	Координаты точки в базовой системе	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>Z</i>	координат	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>WTY</i>	Напряжение при кручении <i>tau-xy</i> при действии момента <i>Mt=1</i>	[1/м ³] ₁₀₁₈	-
<i>WTZ</i>	Напряжение при кручении <i>tau-xz</i> при действии момента <i>Mt=1</i>	[1/м ³] ₁₀₁₈	-
<i>WVY</i>	Напряжение при сдвиге <i>tau-xy</i> при действии усилия <i>Vy=1</i>	[1/м ²] ₁₀₁₇	-
<i>WVZ</i>	Напряжение при сдвиге <i>tau-xy</i> при действии усилия <i>Vz=1</i>	[1/м ²] ₁₀₁₇	-
<i>SIGY</i>	Напряжение в поперечном направлении	[МПа] ₁₀₉₂	-
<i>TEFF</i>	Эффективная (расчетная) толщина	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>CDYN</i>	Надрез и тип нагружения	<i>LIT</i>	-
<i>SIGC</i>	Диапазон допустимых напряжений $\sigma-d_{(-1)}$	[МПа] ₁₀₉₂	*
<i>TAUC</i>	Диапазон допустимых напряжений $\sigma-\tau_{(-1)}$	[МПа] ₁₀₉₂	$\sigma/\sqrt{3}$
<i>MNO</i>	Номер материала в композитном сечении (= 0 если это чисто геометрическая точка)	-	(<i>SECT</i>)
<i>FIX</i>	Степень защемления для проверки соотношения <i>c/t</i>	-	-
<i>REFP</i>	Исходная начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>REFD</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>REFS</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. Также POLY)	<i>Lit8</i>	-

Дополнительные точки для отображения нормальных и сдвиговых напряжений или произвольные точки, характеризуемые геометрическими свойствами, могут быть заданы в расчетной схеме при помощи команды *SPT*. Расчет усталости конструкции возможен только с использованием этих конструктивных точек. Для введенных концентраторов напряжений в базе данных будет создана своя собственная ячейка, в которой будут сохранены значения результирующих напряжений (отображаются только в модуле *WinGRAF*), или, полученные значения напряжений могут быть перенаправлены в модуль *MAXIMA* для создания в расчетной точке состояния суперпозиции напряжений. В большинстве случаев анализ максимальных напряжений может быть выполнен программой с достаточной точностью с учетом всех вершин многоугольных и промежуточных точек тонкостенных элементов расчетной схемы.

Если пользователь не задает концентраторы, то они могут быть заданы автоматически с помощью команды *CTRL SCUT*. Следует отметить, что при учете этапов возведения сечения эти точки будут сгенерированы только на финальной этапе. Если эти точки будут расположены в неэффективной (нерабочей) области сечения, то в этих точках не будет возникать никаких напряжений.

Используя формулу Суэйна (*Swain's formula*), можно рассчитать значения нормальных напряжений исходя из значений координат X и Y .

Напряжения сдвига рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= M_t \cdot W_{ty} + V_y \cdot W_{vy} \\ \tau_{xz} &= M_t \cdot W_{tz} + V_z \cdot W_{vz} \\ \tau &= \sqrt{(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2)}\end{aligned}\tag{3.145}$$

Для тонкостенных сечений коэффициенты напряжений будут определены максимально точно только в том случае, если концентратор будет расположен в пределах (внутри плоскости) элемента сечения. Если интегральные уравнения справедливы для расчета сдвиговых напряжений (*CTRL STYP BEM*), то в процессе расчета всей схемы пользователь может получить единичные значения сдвиговых напряжений во всех вершинах многоугольных элементов и концентраторах,

расположенных внутри многоугольника. При решении некоторых задач, связанных с проектированием, необходимо значение параметра эффективной ширины, которое будет устанавливаться автоматически только для тонкостенных сечений.

Для расчета усталости конструкции в соответствии с *DIN 15018/4132* пользователь может использовать параметр *CDYN*, характеризующий условия работы и типы выемок (литералы *BIW0-B6K4*), а также задать диапазон допустимых значений напряжений при помощи параметров *SIGC* и *TAUC*.

При расчете усталости конструкции в соответствии с *DS 804/DS 805* пользователь может использовать группы надрезов (*WI, WII* или *WIII*, а также *KII, KIII, KIV, KV, KVI, KVII, KIII* (!), *KIX* и *KX*). Допустимые значения напряжений *SIGC* и *TAUC* определяются из таблицы приложения 6. По умолчанию, точные значения доступны для стали *S 235* и *S 355 (DS 804)*, допустимые значения для меньшего класса (марки) будут обрабатываться в соответствии с формулами, приведенными в *DS 805*.

При вводе только параметров *SIGC* и *TAUC* программой будет выбран метод анализа диапазона абсолютных напряжений, требуемый при расчете сплошных сечений.

При расчете состояния суперпозиции напряжений в модуле *MAXIMA* все углы и срединные точки граней многоугольных элементов будут доступны для всех сечений без необходимости ввода команды *SPT*.

При расчете потери устойчивости плиты с использованием отношения *c/t* необходимо задать эффективную толщину *TEFF* и два концентратора с идентичными идентификаторами, характеризующими конечные точки пластины. Точки должны быть заданы на середине линии в месте установленного эффекта (потери устойчивости). Для незафиксированных концов плиты можно ввести параметр *FIX FREE*.

3.43 NEFF – Неэффективные (незадействованные) области сечения

См. также: [SECT](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>TYPE</i>	Тип неактивных усилий (либо любая комбинация из этих усилий): <i>N</i> Нормальное (осевое) усилие <i>Y, MZ</i> Ордината <i>y</i> (момент <i>Mz</i>) <i>Z, MY</i> Ордината <i>z</i> (момент <i>My</i>) <i>V</i> Без интерполированных вершин <i>SIG</i> Автоматический режим учета усилий, исходя из значений напряжений	<i>Lit4</i>	YZN
<i>YMIN</i>	Ордината начальной точки области <i>NEFF</i>	[мм] ₁₀₁₁	-9999
<i>ZMIN</i>	Ордината начальной точки области <i>NEFF</i>	[мм] ₁₀₁₁	-9999
<i>YMAX</i>	Ордината конечной точки области <i>NEFF</i>	[мм] ₁₀₁₁	+9999
<i>ZMAX</i>	Ордината конечной точки области <i>NEFF</i>	[мм] ₁₀₁₁	+9999
<i>MNO</i>	Номер материала, на который влияет данная область (без ввода = все материалы в сечении)	-	-
<i>WIDT</i>	Дополнительная (необязательная) толщина многоугольника	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>NO</i>	Обозначение области <i>NEFF</i>	<i>Lit4</i>	1
<i>SMIN</i>	Концентратор напряжений (<i>YMIN, ZMIN</i>)	[МПа] ₁₀₉₂	-
<i>SMAX</i>	Концентратор напряжений (<i>YMAX, ZMAX</i>)	[МПа] ₁₀₉₂	<i>SMIN</i>
<i>REFI</i>	Точка привязки/базисная точка	<i>Lit4</i>	
<i>RFDI</i>	(<i>YMIN, ZMIN</i>)	<i>Lit4</i>	-
<i>RFSI</i>		<i>Lit4</i>	-
<i>REFA</i>	Точка привязки/базисная точка	<i>Lit4</i>	-
<i>RFDA</i>	(<i>YMAX, ZMAX</i>)	<i>Lit4</i>	-

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>RFSA</i>		<i>Lit4</i>	-

С помощью команды *NEFF* пользователь может обозначить участки многоугольников, сечений *FE* или тонкостенных сечений, в пределах которых не будут действовать различные усилия или изгибающие моменты. Параметр *NYZ*, установленный в программе по умолчанию, деактивируя все компоненты продольного напряжения, является правильным выбором для элементов сечения, которые вообще не воспринимают никаких усилий (например, локальный изгиб/локальная потеря устойчивости). Если замоделировать неравномерное распределение продольных напряжений, нормальное усилие должно оставаться эффективным (воздействовать на область сечения). В модуле *AQB* по причине учета влияния предварительного напряжения, а также ползучести и усадки, возникающее нормальное (осевое) усилие воспринимается всей площадью сечения. Абсолютно во всех случаях при расчете (формировании) жесткости на сдвиг используется вся площадь сечения, вместе с тем, ввиду отсутствия продольных напряжений, незадействованные участки, характеризуются постоянным значением сдвигового напряжения.

При использовании формулы Суэйна (*Swain's formula*) для расчета изогнутых элементов сечения (потеря устойчивости) следует выделить случай, когда момент M_u или плечо z равны нулю. В ПК *SOFiSTiK* всегда используется силовое плечо, поэтому моменты M_Y и M_Z являются лишь синонимами значений координат Z и Y .

В большинстве случаев данный механизм расчета/анализа, во избежание пересечения задействованных и незадействованных участков сечения, будет генерировать соответствующие отступы или промежутки.

Для ввода в расчетную схему области *NEFF* можно использовать угловые точки (y_{min}, z_{min}) и (y_{max}, z_{max}) прямоугольника или параметр *WIDT*, характеризующий ширину прямоугольника вдоль линии с координатами (y_{min}, z_{min}) и (y_{max}, z_{max}) .

При вводе в расчетную схему области *NEFF* в процессе интерполяции создаются дополнительные вершины многоугольника, необходимые для ввода и вывода расчетных параметров, характеризующих конструктивные точки (концентраторы). Эта функция может быть деактивирована дополнительным параметром *V* (*TYPE V*). Для областей *NEFF*, введенных в расчетную схему еще на этапах возведения, параметр *V* применяется всегда.

Для сечений 4-ого класса данная процедура деактивирует незадействованные области сечения в программном коде расчетной схемы заранее.

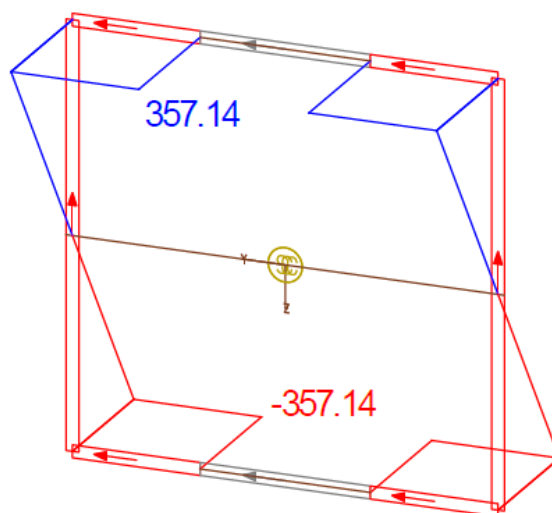


Рис. 3.65 – Результат использования функции ввода незадействованных участков сечения (эпюра напряжений)

Процесс ввода незадействованных участков может быть облегчен за счет их раннего ввода в расчетную схему через модуль *AQUA*, что впоследствии упрощает анализ возникающих напряжений или даже анализ соотношения предельных усилий в модуле *AQB*.

Такая оптимизация расчетной схемы (например, *EN 1993-1-5*) зависит от значений напряжений и, следовательно, в целом от итерационного процесса. При расчете схемы в модуле *AQUA* не учитываются усилия, которые возникнут в участках сечения только после их возведения, однако, учитывается явное распределение напряжений. С учетом этого, самым простым способом такой

оптимизации расчетной схемы является ввод максимального равномерно сжимающего напряжения (нагрузки) – достаточно просто ввести в расчетную схему параметр *SMIN* без каких-либо координат. (*EN 1993 1 5 4.3 (3)*).

При одноосном изгибе на главной оси, проходящей через центр тяжести сечения, необходимо выбрать две точки, в которых и будут определяться напряжения, возникающие в элементах сечения при их нагружении.

Но даже для двухосного изгиба плоскость напряжений может быть определена только двумя точками при условии, что напряжение не меняется перпендикулярно соединительной линии между двумя точками, образующими плоскость напряжений (рис. 3.66). Точные значения напряжений могут быть получены из итерационного анализа в модуле *AQB NSTR*. Так как линейное напряжение в любой точке сечения определяется по формуле:

$$\sigma_x = E \cdot [(\epsilon_0 + (z - z_s) \cdot k_y - (y - y_s) \cdot k_z)] \quad (3.146)$$

напряжения в двух произвольных точках (не обязательно они должны располагаться в пределах сечения), расположенных симметрично центру тяжести вдоль соединительной линии напряжений, могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$\sigma_{min}(y_s - a \cdot k_z, z_s + a \cdot k_y) = E \cdot (\epsilon_0 + a \cdot k_y^2 + a \cdot k_z^2) \quad (3.147a)$$

$$\sigma_{max}(y_s + a \cdot k_z, z_s - a \cdot k_y) = E \cdot (\epsilon_0 - a \cdot k_y^2 - a \cdot k_z^2) \quad (3.147b)$$

$$a = h / \sqrt{k_y^2 + k_z^2} \quad (3.147c)$$

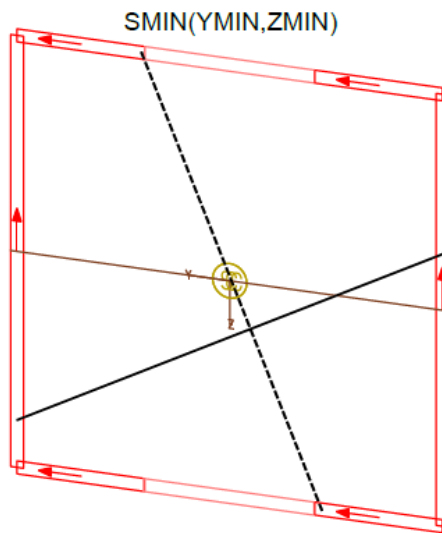


Рис. 3.66 - Определение напряжения на линии между двумя точками, перпендикулярной нейтральной оси

Для балок с осью симметрии учет эксцентриситета в соответствии с *EN 1993-1-1* 6.2.2.5 осуществляется автоматически.

Области *NEFF* эффективны для тонкостенных и сплошных сечений с заданными концентраторами напряжений – c/t .

Этот параметр еще не доступен в графическом редакторе сечений.

3.44 WPAR – Параметры ветрового воздействия/ветровой нагрузки

См. также: *SECT, POLY, PROF, WIND*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>CS</i>	Номер этапа возведения	-	0
<i>KR</i>	Абсолютная шероховатость по умолчанию устанавливается в соответствии с выбранным материалом (<i>MEXT</i>)	[мм]	*
<i>ICE</i>	Толщина ледового покрова или слоя морской растительности/живности (тина, водоросли, моллюски)	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>TRAF</i>	Высота дополнительной области ветрового воздействия, расположенной в пределах движения транспорта	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>YMIN</i>	Габариты области ветрового воздействия (* = габариты сечения)	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>YMAX</i>		[мм] ₁₀₁₁	*
<i>ZMIN</i>		[мм] ₁₀₁₁	*
<i>ZMAX</i>		[мм] ₁₀₁₁	*
<i>YREF</i>	Точка привязки для действия ветрового усилия (* = половина высоты/ширины объекта)	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>ZREF</i>		[мм] ₁₀₁₁	*
<i>CW</i>	Подбор коэффициента сопротивления воздуха, устанавливаемое по умолчанию: <i>CIRC</i> Окружность <i>RECT</i> Прямоугольник <i>I</i> Двутавр <i>C</i> Швеллер <i>T</i> Тавровый профиль	<i>LIT</i>	-

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>ALF</i>	<i>L</i> Уголок Вращение элемента для изменения коэффициента сопротивления элемента	[град.] ₅	0
<i>REFI</i>	Исходная начальная точка (<i>YMIN, ZMIN</i>)	<i>Lit8</i>	*
<i>RFDI</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	*
<i>RFSI</i>	Исходные координаты типовых начальных точек	<i>Lit8</i>	*
<i>REFA</i>	Исходная начальная точка (<i>YMAX, ZMAX</i>)	<i>Lit8</i>	*
<i>RFDA</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	*
<i>RFSA</i>	Исходные координаты типовых начальных точек	<i>Lit8</i>	*
<i>REFP</i>	Исходная начальная точка (<i>YREF, ZREF</i>)	<i>Lit8</i>	*
<i>REFD</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	*
<i>REFS</i>	Исходные координаты типовых начальных точек	<i>Lit8</i>	*

Для анализа ветровой нагрузки на элементы конструкции еще на этапах его возведения пользователь может задать значения для различных параметров. Главным из этих параметров является область ветрового воздействия, которая может быть увеличена ввиду образования льда на элементах конструкции, наличие подвижного состава и увеличения площади сооружения в процессе его возведения. Правильность выбора значений для данных параметров должна быть согласована со значением исходной длины, относительно которой и вводится область ветрового воздействия – команда *WIND*.

Параметр *CW* позволяет учесть в расчетной схеме значение коэффициента сопротивления воздуха по умолчанию, который зависит от формы поперечного сечения элемента. Если в расчетной схеме не задействованы команды *WPAR*,

WIND и *PROF*, то все элементы прямоугольной формы будут приниматься с предупреждением – программа сообщит о недостатке введенных данных.

Точка привязки для ввода в расчетную схему ветрового воздействия по умолчанию расположена в геометрическом центре сечения. Ее расположение относительно центра сдвига сечения может создавать дополнительные крутильные моменты. В особых случаях пользователь может самостоятельно ввести в программу весь набор коэффициентов сопротивления воздуху. Выбранный этап возведения *CS*, в котором учитывается влияние ветрового воздействия (модуль *SOFiLOAD*), действителен на всех последующих этапах.

В настоящее время шероховатость учитывается только при расчете и анализе круглых сечений.

3.45 WIND – Коэффициенты для ветровой и волной нагрузки

См. также: *SECT, POLY, PROF, WPAR*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>ALPH</i>	Угол приложения нагрузки ($-180 \leq \alpha \leq 180$) или тип производной: <i>H1, H2, H3, H4, A1, A2, A3, A4</i>	град. <i>LIT</i>	*
<i>CWY</i>	Коэффициент бокового сопротивления c_d	-	*
<i>CWZ</i>	Коэффициент подъемной силы c_l	-	*
<i>CWT</i>	Коэффициент крутильных колебаний c_m	-	*
<i>REF</i>	Заданные размеры: <i>B</i> Всегда ширина <i>H</i> Всегда высота <i>BH H</i> для <i>CWY</i> , <i>B</i> для <i>CWZ</i> , <i>BH</i> для <i>CWT</i> <i>WB</i> как <i>B</i> , но в перевернутой системе <i>WH</i> как <i>H</i> , но в перевернутой системе <i>WBH</i> как <i>BH</i> , но в перевернутой системе	<i>LIT</i>	<i>BH</i>
<i>CHYD</i>	Гидродинамический коэффициент C_m	-	2.0
<i>CLAT</i>	Коэффициент поперечной силы	-	0.8
<i>S</i>	Число Струхала	-	0.15
<i>VR0</i>	Уменьшение скорости $U/(f \cdot B)$	-	-
<i>V0</i>	и значения производных до 20 пар	-	-
...	данных (параметров) в составе команды		
<i>VR19</i>		-	-
<i>V19</i>		-	-

Силловые коэффициенты необходимы для расчета ветровой или волновой нагрузки в зависимости от направления потока. Значения параметров CWY , CWZ и CWT могут быть рассчитаны по формулам, соответствующие переменным вдоль исходно оси. Для круглых сечений значения данных коэффициентов уже известны и доступны в модулях программы (коэффициенты зависят от числа Рейнольдса и шероховатости). Пользователь также может самостоятельно ввести конкретные значения для каждого коэффициента (например, ванты/кабели в расчетной схеме всегда характеризуются $c_d = 1.2$). Так как в данном случае нет конкретных зависимостей от направления действия ветрового и водного потоков, достаточно одного ввода всех необходимых данных, чтобы в конечном итоге значение результирующего усилия, возникающего в элементе конструкции, было получено по формуле Моррисона (*Morrison*):

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot B \cdot U^2 + \rho \cdot C_{hyd} \cdot A \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (3.148)$$

Все рассмотренные силловые компоненты действуют всегда в направлении движения потока. Если указано значение в направлении cz , то возникающее усилие рассчитывается с учетом косинуса угла, что позволяет моделировать простые случаи также в составе одного ввода всех необходимых данных.

Для других сечений может потребоваться ввод целого комплекса коэффициентов, характеризующих усилия, которые возникают в расчетных элементах при действии на них поперечного потока или крутящего момента, значение которого зависит от угла действия (атаки) потока. Значения коэффициентов от CWY до CWT (см. таблицу выше) также определяется исходя из значения данного угла. При определении значений рассматриваемых коэффициентов необходимо учитывать последовательность углов атаки. При углах атаки, расположенных вне диапазона углов $0^\circ-90^\circ$ или $0^\circ-(-180^\circ)$, кривые на результирующих графиках удлиняются, однако, пользователь может собственноручно ввести данные углы в пределах соответствующих диапазонов. Следует помнить, что ввод в расчетную схему более 99 значений углов не допустим. Для прямоугольных сечений и стандартных стальных профильных

сечений, как и в предыдущих случаях, значения для всех необходимых характеристик известны и доступны в программе по умолчанию. Если для нетипового сечения значения соответствующих характеристик не заданы, то допускается ввод в расчетную схему внешнего огибающего прямоугольного контура (рис. 3.67). Последовательность команд *ECHO WIND FULL* позволяет визуализировать учет гидродинамических коэффициентов для всех сечений.

Особенно важным в процессе расчета является ввод правильных значений коэффициентов, так как в различных литературных источниках зачастую применяются разные значения одних и тех же коэффициентов. Например, в ветроэнергетике система координат ориентирована так, чтобы ось x была направлена в направлении действия ветра, а ось z вертикально вверх:

- Угол приложения нагрузки – это угол между локальной осью y поперечного сечения и вектором нагрузки. Значение в 0° характеризует действие ветровой нагрузки на элемент слева на право в отрицательном направлении оси y ; значение в $+90^\circ$ характеризует действие ветровой нагрузки на элемент снизу вверх в отрицательном направлении оси z . Данная зависимость знака и направления является общепринятой. Так для усилия, действующего в отрицательном направлении, вводятся силовые коэффициенты с положительным значением.

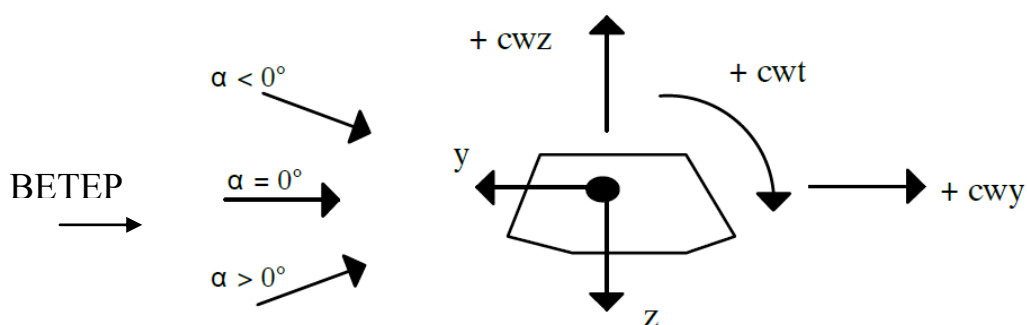


Рис. 3.67 – Угол действия ветровой нагрузки

- Привязка к параметрам WB , WH и WBH (см. таблицу выше) аналогична привязке к параметрам B , H и BH , а коэффициенты CWY и CWZ характеризуют влияние ветра по направлению его действия и

возникающего подъемного усилия (движение поперек и вверх) соответственно (измерения проводятся в аэродинамической трубе). Они преобразуются в значения схемы, которая была рассмотрена ранее (рис. 3.64).

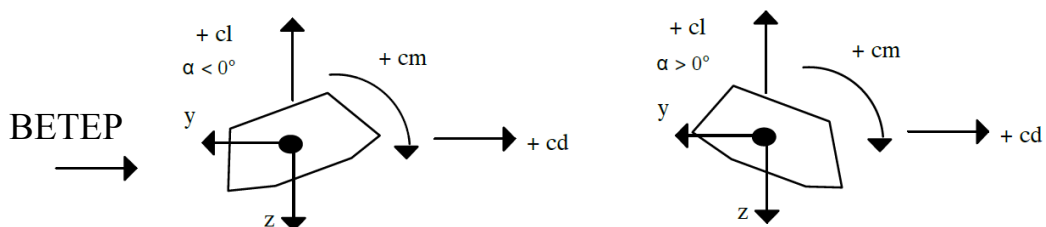


Рис. 3.68 – Угол наклона лопасти в аэродинамической трубе

- Коэффициенты должны определяться по результатам аэродинамических испытаний или численного моделирования потока. Чтобы увеличить ширину полосы частот между максимальным и минимальным значением с учетом небольших изменений в схеме (например, расположение льда), рекомендуется задавать участки для учета действия бокового и вертикального течения потоков отдельно друг от друга. При учете действия кручения используются оба направления течения. Таким образом:

$$\begin{aligned}
 p_y &= -q \cdot c_{wy} \cdot (z_{max} - z_{min}) \\
 p_z &= -q \cdot c_{wz} \cdot (y_{max} - y_{min}) \\
 m_t &= -q \cdot c_{wt} \cdot (y_{max} - y_{min}) \cdot (z_{max} - z_{min}) \\
 p_{lat} &= -q \cdot c_{lat} \cdot (z_{max} - z_{min})
 \end{aligned}
 \tag{3.149}$$

Эти установки в расчетной схеме кажутся странными, однако, при помощи команды *REF* пользователь для привязки всех расчетных коэффициентов к конкретной области может указать как высоту, так и ширину. Следует отметить, что при использовании данной функции в программе отключится шумовая интерполяция и некоторые функции команды *WPAR* (п.п. 3.44). Причина в том, что при интерполяции сечения коэффициенты ветрового воздействия не будут интерполированы, а скопированы из исходного сечения. Таким образом, если

значения коэффициентов были заданы исходя из ширины, изменение высоты не изменит ветровую нагрузку. Многие коэффициенты, приведенные в соответствующей литературе, могут быть легко обобщены, если они введены в расчетную схему с помощью команды *REF BH*.

Для расширенного анализа также можно определить производные по методу Скэнлана (*Scanlan*). Для каждого заданного угла атаки может быть введено до восьми последовательных записей команд, содержащих до 20 пар данных.

$$F_m^L = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[KH_1 \frac{\xi'}{U} + KH_2 \frac{B\alpha'}{U} + K^2 H_3 \alpha + K^2 H_4 \frac{\xi}{B} \right] \quad (3.150)$$

$$F_m^M = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[KA_1 \frac{\xi'}{U} + KA_2 \frac{B\alpha'}{U} + K^2 A_3 \alpha + K^2 A_4 \frac{\xi}{B} \right] \quad (3.151)$$

Таким образом, все эти значения заданы исходя из общей ширины моделируемого объекта b . При импортировании данных следует учитывать, что в опубликованной методике Скэнлана (*Scanlan*) вертикальное усилие направлено вниз в положительном направлении и используется половина ширины элемента B . Поэтому такие значения следует пересчитать и изменить знаки для H_2, H_3, A_1 и A_4 . Производные указанных коэффициентов ветрового воздействия используется для получения асимптотических значений кривых графика, характеризующих действие статической нагрузки на расчетную схему ($K=0$).

3.46 LAY – Слоя армирования

См. также: *SECT, RF, LRF, CRF, CURF*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер слоя (0-9)	-	0
<i>TID</i>	Дополнительный текстовый идентификатор слоя	<i>Lit4</i>	-
<i>TYPE</i>	Тип слоя <i>MIN</i> Минимальное армирование <i>OPT</i> Дополнительное армирование <i>SEQ</i> Порядок (очередь) армирования	<i>LIT</i>	*
<i>MRF</i>	Материал армирования	-	(<i>SECT</i>)

Продольное армирование устраивается в элементе группами по слоям. При расчете все элементы одного слоя будут одновременно задействованы для достижения максимально эффективного их распределения во всех слоях. Чтобы добиться этого в установленном порядке, все элементы слоя должны быть выполнены из одного и того же материала и быть одного типа, то же самое касается их времени включения в работу в составе основного материала (бетона) и этапа возведения конструктивного элемента. Подобный эффект достигается путем ввода команды *LAY* перед расчетными характеристиками рассчитываемого элемента. Идентификатор *TID* в большинстве случаев используется для уточнения местоположения слоя при отображении результатов расчета. По умолчанию для слоя 0 в программе установлена функция *TYPE MIN*, для всех остальных слоев установлена *TYPE OPT*.

3.46.1 Свойства элементов армирования

Элементы армирования и их распределения характеризуются пятью параметрами параметров. Диаметр арматуры задается в расчетной схеме в обязательном порядке.

- AS* является основной характеристикой арматуры (см. ниже)
- ASMA* обозначает максимальное армирование в одном и том же конструктивном элементе (если в программе задан только параметр *ASMA*, то $AS = ASMA$).
- LAY* является идентификатором конкретного слоя (*M* для слоя *MIN*, *S* для слоя *SEQ*, *Z* для слоя *OPT*), также используются номера от 0 до 9.
По умолчанию настройки *LAY* копируются из предыдущего слоя.
- D* диаметр отдельного арматурного стержня, либо в [мм], либо как номинальное значение в виде буква:
'5' в американских нормах проектирования '# 5'.
- A* расстояние между отдельными стержнями или несколькими стержнями.
- DIST* распределение арматурных стержней внутри арматуры.

В большинстве случаев, все армирование сохраняется в программе в виде отдельных стержней, что позволяет проводить нелинейный расчет заданных сечений неограниченное количество раз. В программе, с помощью параметра *DIST*, имеется несколько альтернативных возможностей для распределения арматуры в конструктивном элементе.

- EVEN* все арматурные стержни генерируются в середине конкретного сегмента, в результате чего все области элемента имеют одинаковый вес.

- FULL* все арматурные стержни генерируются в начальной и

	конечной точках сегмента и между ними
<i>INS</i>	начальная и конечная точки не учитываются
<i>ADJA</i>	не учитываются только конечная точка сегмента
<i>ADJE</i>	не учитываются только начальная точка сегмента
<i>NONE</i>	генерируется линия распределения или круговое армирование

На схеме ниже показано распределение арматурных стержней, например, в случае разделения всего армирования элемента на четыре сегмента:

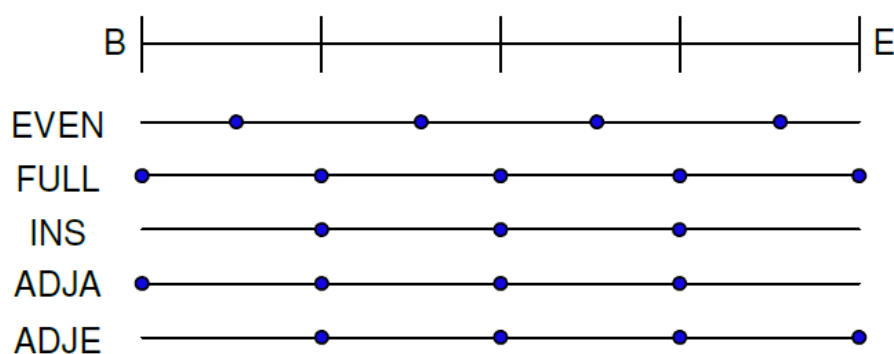


Рис. 3.69 – Распределение арматурных стержней в элементе

Команда *DIST NONE* позволяет создать в расчетной схеме постоянное распределение арматуры, которое в настоящее время использовать не рекомендуется. С учетом этого, для ввода в расчетную схему параметров армирование/длина используются литералы *AS/A*, где литерал *A* должен вводиться в схему со значением до 1.0. В данном случае пользователь может получить общее значение армирования элемента при вводе значения *A*, равного 0.0.

Во всех остальных случаях использования параметра *DIST* значение для *A* вводится в программу из расчета максимального расстояния между арматурными стержнями, содержащегося в *INI*-файле – максимальное расстояние между арматурными стержнями составляет 400 мм. Отрицательные значения *A* характеризуют количество арматурных стержней.

Для области армирования и, особенно, для разделения расчетных характеристик в пределах области анализируемого сечения, выделяются три случая, которые характеризуются конкретными единицами измерения.

[мм ²]	общая площадь армирования
[мм ² /м]	степень армирования
[-]	ввод коэффициента для отдельного стержня диаметром D (единицы [о/о] и [о/оо] имеют тот же эффект)

Если параметр AS не задан, общая площадь армирования будет получена в результате перерасчета схемы исходя из характеристик одиночного арматурного стержня.

В редакторе поперечного сечения реализованы три наиболее популярных способа ввода арматуры, в которых используются параметры AS и $ASMA$. Ниже рассмотрены примеры использования данных способов в модуле $AQUA$:

1. Ввод большого количества арматурных стержней

```

LRF 'L1' YB 220. ZB 470. YE -220. ZE 470. LAY1 M1 DIST EVEN D 20 $$
A 4[-]

```

В серединах четырех сегментов на участке длиной 440 мм создаются 4 арматурных стержня диаметром 20. Расчетный параметр армирования AS , который учитывается при расчете, автоматически равен 12.56 [см²]. Максимальное армирование $ASMA$ может быть введено в расчетную схему в [см²].

2. Ввод длины участка армирования A и степени его армирования AS , $ASMA$

```

LRF 'L2' YB 220. ZB 470. YE -220. ZE 470. LAY M2 DIST EVEN D 20 $$
A 100. AS 28.56[cm2/m]

```

На участке длиной 440 мм арматурные стержни диаметром 20 следует располагать в середине анализируемого сегмента с учетом длины участка армирования, равного 100 мм. В этом случае программа разделяет весь участок армирования на четыре сегмента, каждый длиной 110 мм. Без конкретного значения, заданного пользователем, программа автоматически генерирует схему армирования AS исходя из значения площади арматурного стержня 3.14 [см²].

Данный ввод соответствует классу армирования $AS\ 28.56$ [см²/м]. Максимальное армирование $ASMA$ может быть введено в расчетную схему в [см²/м].

3. Ввод длины участка армирования A и его общего армирования AS , $ASMA$

```
LRF 'L2' YB 220. ZB 470. YE -220. ZE 470. LAY M2 DIST EVEN D 20 $$  
A 100. AS 12.56[cm2]
```

На участке длиной 440 мм с учетом длины армирования A , равного 100 мм, общая площадь армирования равна 12.56 [см²] – 4 стержня диаметром 20. В этом случае программа разделяет весь участок армирования на четыре сегмента, каждый длиной 110 мм, с расположением арматурного стержня площадью 3.14 [см²] в середине каждого сегмента. Максимальное армирование $ASMA$ может быть введено в расчетную схему в [см²].

Для задания периметрического армирования первый способ ввода арматуры, рассмотренный ранее, невозможен. В редакторе поперечного сечения способы ввода арматуры 2 и 3 доступны в аналоговом режиме.

3.46.2 Правила задания слоев армирования

Отношения между слоями армирования регулируются выбранным типом слоя. В расчетной схеме имеются слои с минимальным армированием (MIN , $M0$ - $M9$) и дополнительным армированием (OPT , $Z0$ - $Z9$). При отсутствии каких-либо дополнительных сведений слои с минимальным армированием M устраиваются в элементе исходя из значения параметра AS . С другой стороны, слои с дополнительным армированием Z могут вообще не активироваться в расчетной схеме. Номер слоя не влияет на выбор программой метода подбора габаритных размеров армирующего слоя. Для получения истинных значений характеристик сечений в модуле $AQUA$ используется только минимальное армирование.

В особых случаях, когда требуется обработка армирующих слоев по порядковому номеру, применяются слои S (тип SEQ). Слои S не могут использоваться в комбинации со слоями M или Z . Однако, как исключение из данного правила, минимальное армирование может быть задано для нижнего слоя $M0$.

Для увеличения детализации расчетной схемы также можно ввести поперечные связи со слоями $B1-B31$ в LRF , CRF или $CURF$ (см. п.п. 3.48, 3.49, 3.50). Для анализа эти команды используются только для предварительной настройки некоторых значений параметров команды CUT .

Каждый слой должен содержать только один номер материала. Для обеспечения согласованности всех необходимых элементов расчетной схемы при дальнейшей ее обработке также необходимо, чтобы каждый слой армирования был включен в состав одного материала. Выполнение данных условий поможет программе правильно определить вычитаемые области и значения характеристик эквивалентного сечения.

Схемы армирования с одинаковыми номерами слоев всегда устраивается в элементе пропорционально заданному значению параметра AS . Обычно каждый слой может быть увеличен до момента, пока его первая схема армирования не достигает своего возможного максимума.

Для управления слоями армирования доступны следующие основные параметры:

- симметричное армирование

Арматура, работающая на сжатие и растяжение, устраивается симметрично относительно центра тяжести поперечного сечения элемента, а также с одним и тем же номером слоя. Минимальное армирование устраивается в слое типа M .

- несимметричное армирование

Арматурные стержни, работающие на сжатие и растяжение, устраиваются в разных слоях.

Продольное армирование элемента, работающее на кручение

Ключевые параметры *TORS* и *ACTI/ADDI*, позволяющие учесть влияние кручения, могут быть использованы для анализа и расчета каждого отдельного элемента армирования. Ввод данных параметров в расчетную схему позволяет:

- В процессе определения габаритов необходимое продольное армирование, работающее на кручение, сравнивается с общими активными (*ACTI* и *ADDI*) областями (площадями), распределенными по всей длине кромки элемента, и в процессе увеличения количества слоев армирования, оно (продольное армирование) включается в работу элемента. Элементы продольного армирования, работающие на кручение, не обязательно должны располагаться в одном и том же слое (например, верху/внизу). Однако в случае увеличения значения скручивающего усилия каждый слой армирования увеличивается, включая и те слои, которые не предназначены для восприятия кручения.
- Только армирование, заданное в схеме при помощи параметра *ACTI*, характеризуется в программе как эквивалентное сечение с замкнутым контуром и рассчитывается по методике Бредта. Модуль *AQUA* самостоятельно сортирует элементы в необходимом для правильной работы всей программы порядке и проверяет правильность заданной таким образом площади армирования относительно всей площади поперечного сечения. Результат расчета сохраняется в разделе «*АКТ*» (площадь сдвига) в модуле *ResultViewer* и при необходимости данное значение может быть изменено с помощью параметра *SVAL AY*.

Эффективность спроектированной схемы армирования определяется, либо как эффективность линейной арматуры, непосредственно в [$\text{см}^2/\text{м}$]), либо исходя из количества отдельных точек, характеризующих положение арматуры на определенном расстоянии друг от друга – определенное количество арматурных стержней. Эффективное армирование всей площади сечения элемента распределяется по всему его периметру. С учетом этого следует отметить, что пользователь всецело ответственен за то, чтобы разработанная

схема армирования в полной мере отвечала всем требованиям прочности и надежности, в частности сопротивления кручению.

Ширина раскрытия трещин

Функция AR может использоваться для каждого отдельного арматурного элемента. Данная функция позволяет ввести в расчетную схему все необходимые дополнительные свойства для анализа или расчета ширины раскрытия трещины. В данном случае параметр D уже характеризует диаметр арматуры, при котором обеспечивается раскрытие трещины на заданную ширину. Функция AR в полной мере характеризует расчетную область для единичного анализа/расчета ширины раскрытия трещины, как, например, это регламентируется в документе *DIN 4227 10.2* глава 3. Функция AR позволяет ввести в расчетную схему коэффициент армирования $\mu-z$, который рассчитывается по следующей формуле:

$$\mu - z = \frac{(AS \cdot factor)}{AR} \quad (3.152)$$

3.47 RF – Одиночное армирование

См. также: *SECT, LAY, LRF, CRF, CURF*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение элемента	<i>Lit4</i>	*
<i>Y</i>	Координаты точки внутри системы	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>Z</i>	координат сечения	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>AS</i>	Армирование	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>ASMA</i>	Максимальное армирование (см. п.п. 3.46)	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>LAY</i>	Слой	<i>LIT</i>	(<i>LAY</i>)
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	(<i>LAY</i>)
<i>TORS</i>	Учет действия кручения <i>PASS</i> без учета <i>AKTI</i> учитывается полностью <i>ADDI</i> учитывается частично, т.е. кручение учитывается, но без A_{kt}	<i>LIT</i>	<i>PASS</i>
<i>D</i>	Диаметр	[мм] ₁₀₂₃	-
<i>AR</i>	Расчетная область для анализа ширины раскрытия трещины	[м ²] ₁₀₁₂	-
<i>SIG</i>	Преднапряжение (после ползучести и усадки)	[МПа] ₁₀₉₂	0
<i>TEMP</i>	Значение температуры для расчета пожароустойчивости элемента	С°	*
<i>REFP</i>	Начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>REFD</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>REFS</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-

Если в пределах анализируемого сечения для анализа температурных полей был выбран некоторый участок конечно-элементной сетки (*FEM*), то введенное

значение параметра *TEMP* будет характеризовать (интерполировано) именно этот участок сечения. Если главное сечение хранится в той же базе данных, что и анализируемый участок, то при помощи команды *RF* всё армирование, исходя из установленных критериев в составе параметра *NO*, будет импортировано за исключением координат (например, “A?” или “*”).

3.48 LRF – Линейное армирование

См. также: [SECT](#), [LAY](#), [RF](#), [CRF](#), [CURF](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение линейной арматуры	<i>Lit4</i>	*
<i>YB</i>	Координаты начальной точки внутри системы координат сечения	[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>ZB</i>		[ММ] ₁₀₁₁	*
<i>YE</i>	Координаты конечной точки внутри системы координат сечения	[ММ] ₁₀₁₁	<i>YB</i>
<i>ZE</i>		[ММ] ₁₀₁₁	<i>ZB</i>
<i>AS</i>	Армирование	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>ASMA</i>	Максимальное армирование (см. п.п. 3.46)	[см ²] ₁₀₂₀	*
<i>LAY</i>	Слой	<i>LIT</i>	(<i>LAY</i>)
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	(<i>LAY</i>)
<i>TORS</i>	Учет действия кручения <i>PASS</i> без учета <i>AKTI</i> учитывается полностью <i>ADDI</i> учитывается частично, т.е. кручение учитывается, но без A_{kt}	<i>LIT</i>	<i>PASS</i>
<i>D</i>	Диаметр	[ММ] ₁₀₂₃	-
<i>A</i>	Расчетная длина для <i>AS</i> и <i>ASMA</i> или номера арматурных стержней	[ММ] ₁₀₁₁ / [-]	*
<i>DIST</i>	Распределение арматурных стержней	<i>LIT</i>	<i>EVEN</i>
<i>AR</i>	Расчетная область для анализа ширины раскрытия трещины	[ММ] ₁₀₁₁	-
<i>REFA</i>	Исходная начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>RFDA</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSA</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. POLY)	<i>Lit8</i>	-
<i>REFE</i>	Исходная конечная точка	<i>Lit8</i>	-

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>RFDE</i>	Направляющая конечной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>RFSE</i>	Исходные координаты типовых конечных точек (см. <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-
<i>R</i>	Радиус для расположения арматуры по дуге	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>PHI</i>	Угол для расположения арматуры по дуге	град.	15.

По умолчанию значения координат *YB* и *ZB* равны последним введенным значениям координат *YE* и *ZE* – координаты конечной точки предыдущей линейной арматуры.

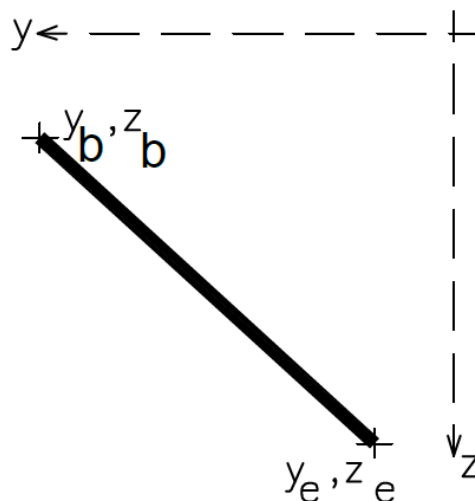


Рис. 3.70 – Линейное армирование

Если в схему вводится радиус, то отдельные точки армирования устраиваются по дуге (< 180 градусов) над заданной хордой. Для каждого сегмента значение угла раскрытия (закругления) будет меньше, чем значение *PHI* (по умолчанию исходя из *CTRL HMIN/HTOL*), а направление дуги округления определяется знаком параметров *PHI* или *R*.

Все направляющие точки всегда располагаются в середине рассматриваемых секторов. Из этого следует, что начальная и конечная точки дуги не являются точками, которые характеризуют положения арматуры внутри

элемента. Если угол закругления в 180 градусов разделить на сегменты по 30 градусов, то отдельные (промежуточные) точки будут располагаться под углами в 15° , 45° , 75° , а также 105° , 135° и 165° градусов.

3.49 CRF - Армирование по окружности

См. также: *SECT, LAY, RF, LRF, CURF*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Обозначение закругленной арматуры	<i>Lit4</i>	*
<i>Y</i>	Координаты центра закругления внутри	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>Z</i>	системы координат сечения	[мм] ₁₀₁₁	0
<i>R</i>	Радиус скругленной арматуры	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>PHI</i>	Угол расположения центра окружности	град.	0
<i>DPHI</i>	Размер сегмента окружности	град.	360
<i>AS</i>	Армирование	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>ASMA</i>	Максимальное армирование (см. п.п. 3.46)	[см ²] ₁₀₂₀	*
<i>LAY</i>	Слой	<i>LIT</i>	(<i>LAY</i>)
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	(<i>LAY</i>)
<i>TORS</i>	Учет действия кручения <i>PASS</i> без учета <i>AKTI</i> учитывается полностью <i>ADDI</i> учитывается частично, т.е. кручение учитывается, но без A_{kt}	<i>LIT</i>	<i>PASS</i>
<i>D</i>	Диаметр	[мм] ₁₀₂₃	-
<i>A</i>	Расчетная длина для <i>AS</i> и <i>ASMA</i> или номера арматурных стержней	[мм] ₁₀₁₁ / [-]	*
<i>DIST</i>	Распределение арматурных стержней	<i>LIT</i>	<i>EVEN</i>
<i>AR</i>	Расчетная область для анализа ширины раскрытия трещины	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>REFP</i>	Начальная точка	<i>Lit8</i>	-
<i>REFD</i>	Направляющая начальной точки	<i>Lit8</i>	-
<i>REFS</i>	Исходные координаты типовых начальных точек (см. также <i>POLY</i>)	<i>Lit8</i>	-

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>REFR</i>	Начальный центр окружности	<i>Lit8</i>	-

Параметр *PHI* используется в случаях, когда необходимо сместить созданные арматурные стержни под другим углом. Данный параметр определяет основное направление армирования (*PHI*: 0 = по оси *z*, -90 = по оси *y*). При вводе в расчетную схему параметра *DPHI* скругленная арматура будет генерироваться в сегменте в пределах от $PHI - DPHI/2$ до $PHI + DPHI/2$. При вводе *DPHI* 0 будет сгенерирована одиночная точка армирования.

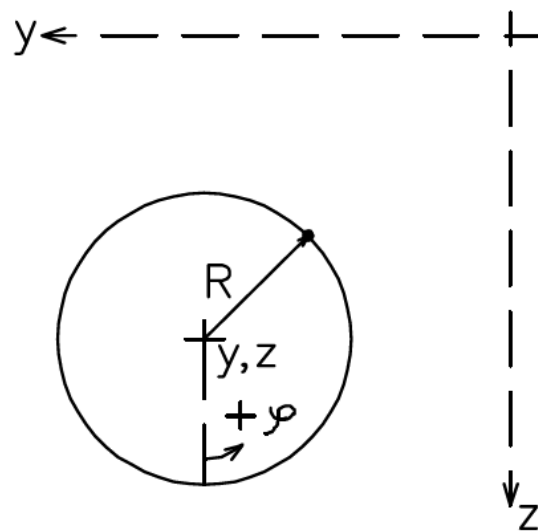


Рис. 3.71 – Армирование по окружности

3.50 CURF – Армирование по периметру

См. также: *SECT, LAY, RF, LRF, CRF*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>H</i>	Углубление арматуры по периметру элемента (защитный слой бетона)	см/мм	-
<i>EXP</i>	Обозначение типа окружающей среды, как дополнение к параметру <i>H</i> , определяемому по формуле $CNOM+D/2$ (см. п.п. 3.18 <i>MEXT</i>)	<i>Lit</i>	-
<i>AS</i>	Армирование	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>ASMA</i>	Максимальное армирование (см. п.п. 3.46)	[см ²] ₁₀₂₀	-
<i>LAY</i>	Слой	<i>LIT</i>	(<i>LAY</i>)
<i>MRF</i>	Номер материала армирования	-	(<i>LAY</i>)
<i>TORS</i>	Учет действия кручения <i>PASS</i> без учета <i>AKTI</i> учитывается полностью <i>ADDI</i> учитывается частично	<i>LIT</i>	<i>PASS</i>
<i>D</i>	Диаметр	[мм] ₁₀₁₁	*
<i>A</i>	Расстояние между стержнями арматуры	[-]	
<i>DIST</i>	Распределение арматурных стержней	<i>LIT</i>	<i>EVEN</i>
<i>AR</i>	Расчетная область для анализа ширины раскрытия трещины	[мм] ₁₀₁₁	-
<i>CENT</i>	Центрирующий коэффициент (фактор)	-	1000

Команда *CURF* может использоваться для задания кругового армирования, т.е. по периметру, для многоугольных элементов. Защитный слой может быть задан в расчетной схеме двумя разными параметрами: при помощи постоянного значения *H* или при помощи переменной *MEXT CNOM*, которая зависит от свойств используемого материала. При любом значении параметра *EXP* в

расчетной схеме абсолютно для всех граней элемента защитный слой будет рассчитываться по формуле $CNOM+D/2$. Если $CNOM$ не задан, то для создания в расчетной схеме защитного используется параметр H .

Для создания армирования по всему периметру элемента необходимо, чтобы тип окружающей среды (класс экспозиции) для арматуры совпадал с типом среды, заданным для основного материала элемента, например, бетона. При наличии в расчетной схеме сложных многогранных элементов (рис. 3.73), которые необходимо проанализировать и при необходимости изменить соответствующие параметры, для оптимизации рабочего процесса пользователь может воспользоваться специальным символом “*” или другим эквивалентом. При любых других установках в расчетной схеме армирование будет создаваться только в тех гранях элемента, которые отвечают всем требованиям, установленные программой. Учитывая данную особенность, пользователь может самостоятельно контролировать процент армирования в каждой грани конструктивного элемента. Параметр распределения арматуры $DIST$ при любом количестве граней, составляющих конструктивный элемент.

ПРИМЕЧАНИЕ: Классы экспозиции описывают физические и химические условия окружающей среды, воздействию которых подвергается бетон. Чтобы бетонные конструкции служили не менее 50 лет и оставались прочными, необходимо при подборе класса бетона и арматуры учитывать требования, предъявляемые к соответствующим классам экспозиции (пример на рис. 3.72).

Параметр A характеризует максимальное расстояние между одиночными арматурными стержнями. Однако, если в расчетной схеме не задано значение для параметра $DIST INS$, то, по крайней мере, один арматурный стержень будет размещен в каждом углу элемента. Параметры AS , $ASMA$ могут быть введены в расчетную схему в зависимости от длины армированного элемента или в виде отдельных стержней (используемые единицы измерения, например, $мм^2$ или $см^2/м$). Ввод в виде отдельных арматурных стержней при помощи параметра A невозможен. Для армирования многоугольных круглых элементов вместо

параметрического армирования рекомендуется использовать линейного армирования LRF с радиусом R и углом PHI .

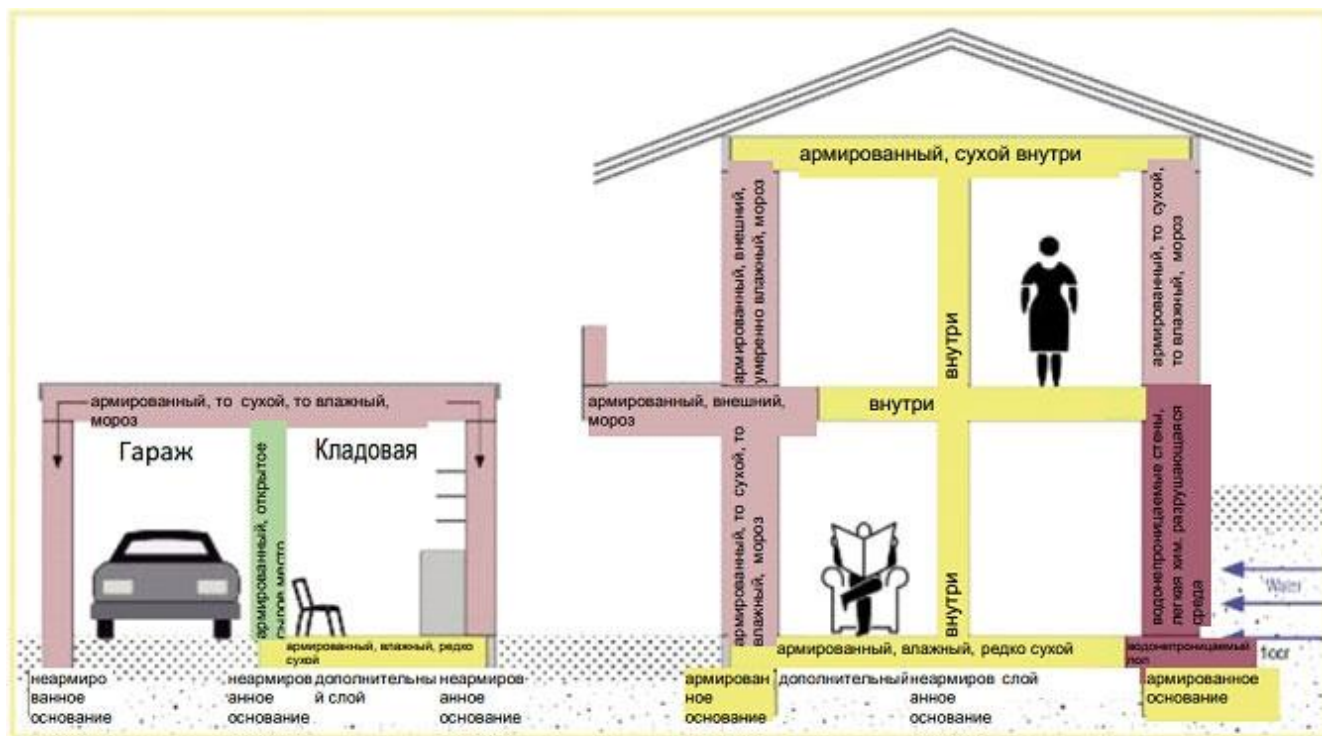


Рис. 3.72 – Классы экспозиции для жилых помещений

Так как в процессе проектировании полезно, чтобы центр арматуры совпадал с центром поперечного сечения, модуль *AQUA*, используя метод наименьших квадратов, в автоматическом режиме пытается изменить распределение арматуры таким образом, чтобы данная установка была достигнута. Количество арматуры, распределенной по периметру элемента, сохраняется без изменений, однако густота (плотность) армирования увеличиваются или уменьшаются в отдельных гранях элемента. При вводе в схему параметра *CENT 0.0* или *AS* (отдельных арматурных стержней) данная функция автоматического распределения арматуры может быть отключена.

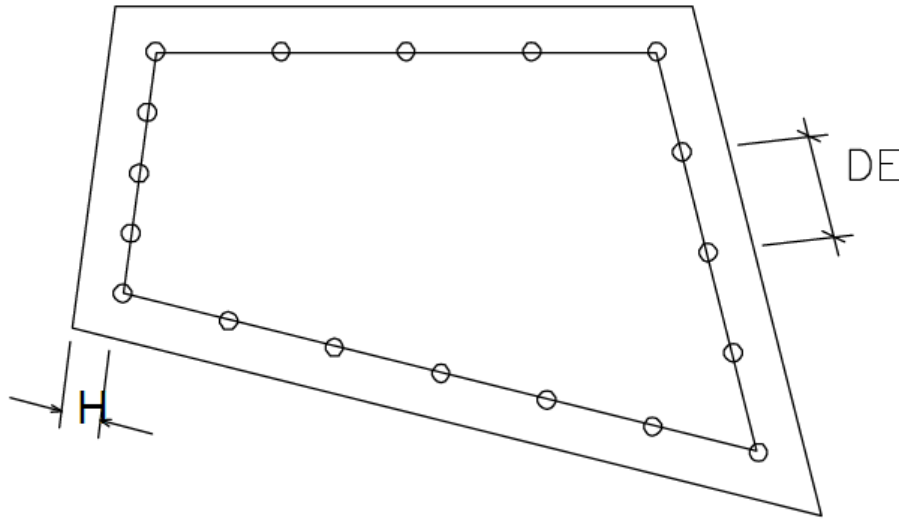


Рис. 3.73 – Армирование по периметру элемента (многоугольник)

3.51 TVAR – Переменные шаблона

См. также: [SECT](#)

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NAME</i>	Наименование переменной	<i>Lit16</i>	!
<i>VAL</i>	Значение переменной или в формате формулы/выражения “= <i>expression</i> ”	<i>Lit64</i>	!
<i>SCOP</i>	Область переменной Если задана, то переменная сохраняется в базе данных	-	*
<i>CMNT</i>	Комментарий к переменной	<i>Lit32</i>	-

Переменные *SOFiSTiK*, заданные при помощи *STO#* или *LET#*, являются глобальными и влияют на всю расчетную схему. Для более сложных задач, таких как генерация шаблонов сечения, становится необходимым задание переменных, действующих только в установленной пользователем области (область переменной). Команда *TVAR* позволяет очень обобщенно задать эти числовые переменные, действующие в пределах произвольно выбираемых пользователем областях. Определение литералов, таблиц данных или результирующих функций невозможно.

Если в составе команды *TVAR* не задана область переменной, то значение переменной сохраняется для текущего сечения. В результате, использование этой переменной становится возможным для шаблонных формул, даже если эта переменная не задана как глобальная. Несколько определений одной и той же переменной следует применять только в особых случаях.

Переменные, используемые для работы с сечением, имеют очень сложную иерархию:

- Первоочередными являются переменные, заданные при интерполяции вдоль оси.

- После используются все переменные, заданные в общедоступных областях (от 0 до 99999), либо с помощью *CADINP* и *LET#*, либо с помощью *TVAR* и конкретно заданной области.
- Наконец, для переменной используется значение, которое было действительным на момент создания поперечного сечения. Если ни одна другая область не была использована в первую очередь, это значение, было введено с помощью команды *TVAR*. Все используемые значения сохраняются в базе данных вместе с поперечным сечением и обновляются при каждом использовании команды *INTE*.

В качестве наименования переменной может служить простая числовая последовательность (числовой индекс). Для параметра *VAL* можно также указать последовательность, содержащую до 8 значений, которая затем будет приписана к следующим индексам:

```
TVAR INC(0) 0.05
```

```
TVAR ALF '=ARC(ATN(+ #INC,+1)),ARC(ATN(- #INC,-1))' SCOP 1
```

Значения некоторых свойств (например, в Еврокоде) зависят от государства, а точнее от переходного значения («*boxed values*»), соответствующее определенному государственному стандарту, по которому проектируется сооружение. В случае, когда переходные значения неизвестны, учитывая государственные стандарты и нормы проектирования, пользователь может обратиться к *INI*-файлу, в котором и содержится нужное переходное значение. Все наименования и воздействия (*DESI*, *COMB* и т.д.) приведены в файле *master.ini*.

В особых случаях эти значения могут быть заданы с помощью команды *TVAR*. Например, если требуется уменьшение модуля упругости для кривой *CALC*, можно ввести коэффициенты *ALF-CE* и *GAM-CE*:

```
TVAR "ALF-CE" 0.85 SCOP DESI
```

```
TVAR "GAM-CE" 1.25 SCOP DESI
```

3.52 *INTE* – Интерполирование или варианты сечений элемента

См. также: *SECT*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>NO</i>	Номер нового сечения или <i>ALL</i> Перестроить все интерполированные сечения <i>ADD</i> Вставить поперечное сечение	<i>-/LIT</i>	!
<i>NS0</i>	Номер 1-ого расчетного сечения (главное)	-	-
<i>NS1</i>	Номер 2-ого расчетного сечения	<i>-/LIT</i>	-
<i>S</i>	Параметр интерполяции или значение базисной станции	- -	- -
<i>NREF</i>	Номер базовой (исходной) оси балки		

При вводе в расчетную схему параметра *INTE ALL* (или *INTE 0*) все сечения, сохраненные в базе данных, будут отмечены как сечения, подлежащие интерполированию. В зависимости от выбора базовой оси *NREF* в программе будут обрабатываться только те сечения, которые расположены вдоль этой базовой оси, или вдоль всех доступных осей (без ввода *NREF*).

При автоматической интерполяции в модуле *AQUA* для построения новых сечений создаются свободные номера *NO*, превышающие по значению на 100 и более единиц номер активного шаблона сечения. Эти сечения удаляются и переназначаются, если эта процедура интерполяции повторяется, а более подробные результаты будут отображены только в том случае, если в программу введена команда *ECHO SDEF EXTR*. В случае интерполяции сечений вместе с главным сечением их количество можно регулировать следующим образом:

- Главное поперечное сечение должно иметь номер 100 или больше.
- Все последующие интерполированные сечения относительно главного имеют номер + 1 больше предыдущего (начиная с главного сечения).

Например, если главное сечение получает номер 200, то интерполированные сечения начинаются с номера 201.

Команда *INTE* позволяет менять значения координат и толщину профиля либо путем интерполяции со вторым сечением, либо с помощью переменных, расположенных вдоль оси. На втором этапе будут задействованы все программные установки, характеризующие главное сечение. Все негеометрические характеристики наследуются от главного сечения. Учитывая все вышеизложенное можно сказать, что при перестановке двух сечений местами процесс интерполяции не будет идентичен первому варианту расположения сечений.

Модуль *AQUA* проверит сгенерированные сечения на наличие дубликатов. Данное сечение может использоваться модулем не один раз. Команда *INTE ALL 1* будет подавлять данную функцию.

Также имеется возможность интерполировать стандартизированные сечения (металлические профиля, заводские балки *T-beam*).

Номера этапов возведения сгенерированных сечений могут быть изменены. Значение переменной *CSI_SELECTi* ($i = 1 \dots 9$) характеризует новый номер для i -го этапа возведения сечения. Все последующие этапы возведения будут сдвинуты на одно и то же значение, если конечно они не заданы так же, как в предыдущем случае (*CSI_SELECTi*).

Отдельные сечения могут быть также интерполированы напрямую, вырезаны или включены в состав другого сечения. Для включенных элементов имеется возможность:

- Просто скопируйте заданное сечение. При этом в шаблоне поперечного сечения также могут учитываться измененные в данный момент переменные (*TVAR*). Для этого требуется только ввод параметра *NS0*.
- Можно использовать линейную интерполяцию между двумя сечениями, конструктивы которых полностью идентичны друг другу. Для этого метода необходимо указать два номера поперечных сечений и коэффициент интерполяции S (0 для *NS0*, 1 для *NS1*).

- И последнее, но не менее важно, вы можете выдать необходимый шаблон сечения NSO при помощи базисных точек или точек привязки вдоль общей оси кривой. Данная функция реализуется путем ввода базисной оси $NREF$, общего значения базисной станции S , постоянной для всех осей и базисного (основного) сечения NSO .
- Если параметр NO введен в программу с положительным знаком, будет создано новое сечение.
- Если параметр « NO » введен в программу вместе с параметром ADD , то существующее или интерполированное поперечное сечение включается в состав текущего поперечного сечения. Эта опция также предназначена для случаев, когда требуется добавить дополнительные характеристики к уже импортированному в расчетную схему сечению.

При включении стандартизированных сечений в состав текущего сечения будут учтены только геометрические характеристики.

3.53 *IMPO* – Импорт данных

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>MAT</i>	Номер материала (<i>ALL</i> = все)	<i>-/LIT</i>	-
<i>SECT</i>	Номер сечения (<i>ALL</i> = все)	<i>-/LIT</i>	-
<i>FROM</i>	Наименование базы данных для чтения	<i>Lit255</i>	!
<i>TO</i>	Укажите новый номер сечения	-	-

С помощью команды *IMPO* пользователь может импортировать материалы и сечения из базы данных в текущую базу данных проекта. Импортированные сечения могут получить новый номер, а этапы его возведения могут быть перенесены на другой номер.

При импорте материала все не введенные характеристики задаются программой автоматически. Существующие материалы могут быть перезаписаны только путем самостоятельного ввода через команду *MAT*. Пользователь в полной мере несет ответственность за правильность ввода характеристик и определения типов материалов.

Все импортированные, а также существующие сечения, всегда будут повторно анализироваться программой в случае изменения материала. При импорте, насколько это будет возможно, будут обновлены данные о материалах и сечениях.

3.54 EXPO – Экспорт данных *Ansi*

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>MAT</i>	Номер материала (<i>ALL</i> = все)	-	0
<i>SECT</i>	Номер сечения (<i>ALL</i> = все)	-	0
<i>TO</i>	Имя файла для записи	<i>Lit96</i>	*
<i>PASS</i>	Пароль <i>CDB</i> для экспорта	<i>Lit16</i>	-

С помощью команды *EXPO* пользователь можете экспортировать материалы и сечения в базе данных во входной файл *AQUA*. В некоторых случаях данная функция может оказаться полезной. Если параметры *MAT* или *SECT* введены в программу с отрицательным знаком, то экспорт материалов и сечений деактивируется.

Если имя файла не указано, данные будут добавлены в последний созданный файл или программа самостоятельно создаст файл с именем *project_AQU.DAT*.

Единицы измерения характеристик зависят от текущего значения параметра *UNIE* в составе команды *PAGE*. Язык нового файла будет таким же, как текущий входной файл *CADINP*.

2.55 ECHO – Объем отображения результатов

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
<i>OPT</i>	<p>Используемые обозначения функций:</p> <p><i>MAT</i> Характеристики материала</p> <p><i>SNO</i> Сохраненные параметры сечения</p> <p><i>SECT</i> Элементы поперечного сечения</p> <p><i>REFP</i> Сгенерированные элементы и привязки</p> <p><i>SDEF</i> Переназначение характеристик поперечного сечения</p> <p><i>SYST</i> Система статистики</p> <p><i>PICT</i> Характеристики отчетного чертежа</p> <p><i>IEQ</i> Границы топологического анализа</p> <p><i>WIND</i> Коэффициент ветрового воздействия</p> <p><i>SPRI</i> Характеристики пружин</p> <p><i>BORE</i> Характеристики сечения скважины</p> <p><i>FULL</i> Используются все функции</p>	<i>LIT</i>	<i>FULL</i>
<i>VAL</i>	<p>Объем отображения результатов</p> <p><i>OFF</i> ничего не рассчитано/вывод</p> <p><i>NO</i> без вывода</p> <p><i>YES</i> стандартный набор результатов</p> <p><i>FULL</i> расширенный набор</p>	<i>LIT</i>	<i>FULL</i>

Команда	Описание	Ед. изм.	По умолчанию
VAL2	<i>EXTR</i> максимально полный набор Дополнительное значение	-	-

В случае отсутствия в расчетной схеме команды *ECHO* для всех функций установлена настройка *YES* (для функции *ECHO MAT* установлена настройка *NO*). Поэтому для того, чтобы в схеме были активен расширенный отчет (*FULL*), достаточно ввести любую функцию самостоятельно. Команда *ECHO* в начале каждой строки кода расчетной системы.

MAT

<i>NO</i>	Только наименование норм проектирования и материалы
<i>YES</i>	Постоянные свойства материала
<i>FULL</i>	Кривые напряжения-деформации и материалы
<i>EXTR</i>	Термические и гидравлические постоянные свойства материала

Функции команды *ECHO* могут быть введены в любом месте кода расчетной схемы, последний ввод будет применен ко всем сечениям. Однако с помощью команды *ECHO SNO n1 n2* можно запомнить текущие активные характеристики сечений с *n1* по *n2* для последующего их вывода в составе отчетной документации.

Функция *ECHO SECT* позволяет выбрать отдельные элементы сечения для отображения их в отчетной документации в формате *FULL* и *EXTR*. Если эти элементы не являются неким дополнением, то в отчетной документации будут отображены результаты только этих выбранных элементов.

SECT

<i>YES</i>	Отображаются только характеристики сечения (<i>SV, PLA 1, LAY</i>)
<i>FULL</i>	Отображаются наиболее важные характеристики для каждого сечения (<i>SV, PAR, ADD, PLA 2, LAY, TYPE</i>)
<i>EXTR</i>	Отображаются отдельные элементы поперечного сечения (<i>SPT, PPT, CIR, PAN, WEL, CUT 2, NEFF, PRF 1, LRF</i>)
<i>SV</i>	характеристики всего сечения
<i>PAR</i>	характеристики участков сечения
<i>ADD</i>	дополнительные характеристики сечения
<i>PLA</i>	Предельные усилия (1=одиночное, 2=комбинация)
<i>LAY</i>	Арматурная ведомость
<i>TYPE</i>	Стандартизированные сечения
<i>SPT</i>	концентраторы напряжений
<i>PPT</i>	вершины многоугольника
<i>CIR</i>	окружности/круги
<i>PAN</i>	тонкостенные элементы
<i>WEL</i>	сварные швы и соединения (шпильки, болты, гвозди)
<i>CUT</i>	плоскости сдвига (1=плоскость, 2=точки)
<i>NEFF</i>	неэффективные области
<i>PRF</i>	Точка расположения арматуры (1=пользовательская, 2=сгенерированная)
<i>LRF</i>	Линейное армирование и армирование по окружности
<i>REF</i>	Базисная/исходная точка, точка привязки (всегда дополнительная)
<i>FEM</i>	Конечно-элементная точка (всегда дополнительная)
<i>GEN</i>	все сгенерированные элементы сечения (всегда дополнительные)
<i>GPRF</i>	все сгенерированные элементы армирования (всегда

дополнительные)

SDEF

<i>YES</i>	Поперечные сечения, которые были введены только в этом расчете
<i>FULL</i>	плюс неизменные сечения в базе данных
<i>EXTR</i>	плюс интерполированные сечения

SYST

<i>YES</i>	Статистика общей суммы сечений и масс в расчетной схеме (доступна только при переназначении характеристик)
------------	--

PICT

<i>NO</i>	Нет чертежей и схем для отображения
<i>YES</i>	Качественные чертежи с затенением
<i>FULL</i>	Контуры, включая базовые статические элементы
<i>EXTR</i>	Максимально информативные чертежи и схемы

С помощью параметра *VAL2* можно переключиться с автоматически сгенерированной системы координат на пользовательскую систему координат (система координат внутри сечения). При вводе значений от 1 до 4 ось *у* выровнена по левой стороне, вниз, по правой стороне и вверх соответственно. Другие значения характеризуют угол поворота системы координат в градусах.

IEQ

<i>NO</i>	Без дополнительного вывода
<i>FULL</i>	Подробный топологический отчет анализируемого сечения скважины для генерации сетки или интегральных уравнений.

<i>WIND</i>	только в связке с командой <i>ECHO SECT</i>
<i>NO</i>	Без вывода
<i>YES</i>	Значения и графики введенных коэффициентов ветрового воздействия
<i>FULL</i>	Значения и графики всех введенных коэффициентов ветрового воздействия (включая предустановленные параметры <i>SREC, PROF</i>)
<i>EXTR</i>	Отображается полный диапазон значений производных – метод Скэнлана (<i>Scanlan</i>)
<i>IEQ</i>	
<i>NO</i>	Без вывода
<i>YES</i>	Значения и графики зависимостей характеристик пружинного элемента
<i>BORE</i>	
<i>NO</i>	Без вывода
<i>YES</i>	Таблица с расчетными характеристиками поперечного сечения скважины

4 ВЫВОД ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА/АНАЛИЗА

4.1 Информация об использованной нормативной документации

Вывод отчетной документации начинается с уточнения используемой нормативной документации:

Нормативная документация, установленная в программе по умолчанию ...
класс/тип документации

Используемая нормативная документации отображается здесь.

Ввод типа документации в составе команды *NORM CAT* отображается здесь.

Высота над уровнем моря

Зона ветрового воздействия

Зоны снеговой нагрузки

Сейсмический район

4.2 Свойства материала

При вводе команды *ECHO MAT NO* выводятся только номера используемых материалов. Таблицы свойств материала выводятся при использовании команды *ECHO MAT YES*.

Общие свойства материала

No.

Номер материала

Модуль Юнга

Модуль упругости для расчета и анализ деформаций (*DIN 1045-1 E_{cm}!*)

Коэффициент Пуассона

Коэффициент Пуассона

Модуль сдвига

Модуль сдвига

Модуль упругости на сжатие

Модуль упругости на сжатие

Вес

Удельный вес

Плавуемость	Механическая характеристика грунта
Коэффициент температурного удлинения	Коэффициент температурного удлинения
Модуль Юнга $E-90$	Анизотропный модуль упругости
Коэффициент Пуассона $m-90$	Анизотропный коэффициент Пуассона
Меридианный угол	Для описания анизотропии свойств материала
Угол наклона	Угол наклона для описания анизотропии свойств материала
Коэффициент запаса	Коэффициент запаса по материалу
Расчетная прочность f_y	Расчетная прочность
Предельная прочность f_t	Предельная прочность

Бетон

Прочность f_c	Расчетная прочность
Номинальная прочность f_{cn}	Номинальная прочность (кубическая или цилиндрическая прочность)
Прочность на сжатие f_{ctm}	Среднее значение прочности
5% от прочности на растяжение f_{ctk}	Квантиль прочности на растяжение
95% от прочности на растяжение f_{ctk}	Квантиль прочности на растяжение
Прочность сцепления f_{bd}	
Рабочее напряжение или напряжение, возникающее в процессе эксплуатации	
Усталостная прочность	

Сталь

Напряжение текучести f_y	Предел текучести
Предел текучести при сжатии f_{yc}	Предел текучести при сжатии
Прочность на растяжение f_t	Прочность на растяжение
Прочность на сжатие f_c	Прочность на сжатие
Предельные пластические деформации	Предельные деформации
Относительный коэффициент сцепления	Относительный коэффициент сцепления
Коэффициент сцепления K_1 из норм $EC2$	Коэффициент сцепления K_1 из норм $EC2$
Модуль упрочнения	
Предел пропорциональности	
Динамический диапазон напряжений	
Максимальная толщина	Максимальная толщина материала
Коэффициент релаксации $0.55 \cdot f_t$	Коэффициент релаксации $0.55 \cdot f_t$
Коэффициент релаксации $0.70 \cdot f_t$	Коэффициент релаксации $0.70 \cdot f_t$

Древесина

Прочность на изгиб f_m	Прочность на изгиб
Прочность на растяжение $f_{t,0}$	Прочность при растяжении вдоль волокон
Прочность на растяжение $f_{t,90}$	Прочность при растяжении поперек волокон
Прочность на сжатие $f_{c,0}$	Прочность при сжатии вдоль волокон
Прочность на сжатие $f_{c,90}$	Прочность при сжатии поперек волокон
Прочность на сдвиг f_v	Прочность на сдвиг

Прочность на сдвиг f_v, T

Прочность на кручение

Каменная или кирпичная кладка

Прочность на сжатие $f_c, 0$

Номинальная прочность

Прочность на сжатие

Прочность на растяжение f_t

Прочность на растяжение

Прочность на сдвиг f_v

Прочность при сжатии вдоль волокон

Адгезионная прочность/прочность сцепления

Прочность при сжатии поперек волокон

Прочность на растяжение отдельного элемента кладки (камня, кирпича)

Слоистый материал (*MLAY*)

Толщина слоя

Толщина слоя в метрах

Номер материала (*No.*)

Номер материала и обозначение материала

Нелинейный материал

Нелинейный материал

Вязкопластичный материал – модель работы фон Мизеса (*NMAT VMIS*)

Напряжение текучести f_y

Модуль упрочнения

Зависимость свойства (коэффициента)

вязкости от ...

График закона ползучести

Вязкость

Нелинейный материал

**Вязкопластичный материал – модель
работы Друкера-Прагера (NMAT
DRUC)**

Угол трения

Сцепление

Прочность на растяжение ft

Угол дилатансии

Прочность на сжатие

Предельные пластические деформации

Предельные пластические
деформации

Предельный угол трения

Предельный угол трения

Предельное сцепление

Зависимость свойства (коэффициента)

вязкости от ...

График закона ползучести

Вязкость

Нелинейный материал

**Модель работы грунта Кулона - Мора
(NMAT MOHR)**

Угол трения

Сцепление

Прочность на растяжение ft

Угол дилатансии

Прочность на сжатие

Предельные пластические деформации

Предельные пластические
деформации

Предельный угол трения

Предельный угол трения

Предельное сцепление

Нелинейный материал	Модель с независимым упрочнением формоизменения и уплотнения грунта (<i>NMAT GRAN</i>)
Угол трения	
Сцепление	
Прочность на растяжение f_t	
Угол дилатансии	
Прочность на сжатие	
Предельные пластические деформации	Предельные пластические деформации
Предельный угол трения	Предельный угол трения
Предельное сцепление	
Начальное давление	
Нелинейный материал	Увеличение объема грунта/набухающие грунты (<i>NMAT SWEL</i>)
Изотропное увеличение объема	
минимальное предельное значение напряжения	
равновесное напряжение (давление)	
Вязкое замедление	
Нелинейный материал	Дефекты/повреждения в скальных грунтах – выработка грунта (<i>NMAT FAUL</i>)
Изменение (нарушение) угла внутреннего трения	
Изменение (нарушение) сцепления	
Изменение прочности на растяжение	Изменение прочности на

растяжение

Изменения относительного объемного
расширения

Меридианный угол

Угол наклона (скважины)

Нелинейный материал

Скальный грунт/2D модель
Мора-Кулона (*NMAT ROCK*)

Изменение (нарушение) угла
внутреннего трения

Изменение (нарушение) сцепления

Изменение прочности на растяжение

Изменение прочности на
растяжение

Изменения относительного объемного
расширения

Меридианный угол

Угол внутреннего трения

Сцепление

Прочность на растяжение ft

Угол дилатансии

Прочность на сжатие

Нелинейный материал

Модель работы грунта Гудехуса
(*Gudehus*) (*NMAT GUDE*)

Угол внутреннего трения

Сцепление

Прочность на растяжение ft

Угол дилатансии

Прочность на сжатие

Предельные пластические деформации

Предельные пластические деформации

Предельный угол внутреннего трения

Предельное сцепление

Нелинейный материал

Модель работы грунта
Ладе (*Lade*)
(*NMAT LADE*)

Параметр *P1*

Параметр *P2*

Прочность на растяжение *ft*

Параметр *P4*

Прочность на сжатие

Предельные пластические деформации

Предельные пластические деформации

Параметр *P7*

Параметр *P8*

Нелинейный материал

Текстильные навесы/мембраны
(*NMAT MEMB*)

Параметр *P1*

Параметр *P2*

С помощью команды *ECHO MAT FULL* можно вывести пользовательские кривые зависимостей напряжений и деформаций. При использовании команды *ECHO MAT EXTR*, помимо пользовательских кривых, также выводятся и стандартные кривые:

eps (о/оо)

Деформации, измеряемые в о/оо

$sig-m$ (MPa)	Кривая напряжения-деформации для анализа эксплуатационных свойств
$sig-u$ (MPa)	Кривая напряжения-деформации для анализа действия предельных нагрузок
$sig-r$ (MPa)	Кривая напряжения-деформации для анализа средних значений
$E-t$ (MPa)	Тангенциальный модуль упругости в конкретном месте
Коэф-т запаса	Запас по материалу

В каждом случае известен тангенциальный модуль упругости для получения (анализа) следующего ряда кривых зависимостей напряжений и деформаций.

Упругое основание (**BMAT**)

$No.$	Номер материала
Cs [kN/m^3]	Упругое основание главного направления
Ct [kN/m^3]	Упругое основание поперечного направления
ft [MPa]	Прочность на растяжение
fy [MPa]	Напряжение текучести
tan [-]	Коэффициент трения поверхности
c [MPa]	Сцепление
dil [-]	Коэффициент дилатансии
w [kN/m^3]	Плотность

Теплофизические и гидравлические постоянные свойства материала (**HMAT**)

$No.$	Номер материала
$TEMP$	Температура или уровень порового

$S [J/K \cdot m^3]$

$K_{xx} [W/K \cdot m^3]$

$K_{yy} [W/K \cdot m^3]$

$K_{zz} [W/K \cdot m^3]$

давления воды

Удельный коэффициент емкости (тепла
или воды)

Проницаемость или проводимость

4.3 Сечение грунтового основания

Если сечения грунтового основания были введены в расчетную схему при помощи команд *BORE*, *BLAY*, *BBAX* или *BBLA*, то вывод результирующих значений осуществляется с помощью команды *ECHO BORE YES*. Используемые маркеры означают следующее:

Номер (№) профиля скважины с маркировкой

<i>X [m]</i>	Координаты расположения скважины (точка начала)
<i>Y [m]</i>	
<i>Z [m]</i>	
<i>dX [-]</i>	Направление скважины
<i>dY [-]</i>	
<i>dZ [-]</i>	
<i>a [°]</i>	Угол наклона вокруг локальной оси
<i>S [m]</i>	Ордината вдоль скважины
<i>Mat</i>	Номер материала от заданной ординаты
<i>s [m]</i>	Начало и/или конец глубины залегания грунта
<i>K0-a, K1-a, K2-a, K3-a</i>	Постоянные свойства сечения грунтового основания
<i>M0</i>	Поверхностное трение в кН/м
<i>C0</i>	Максимальное поверхностное трение в кН/м
<i>TANR</i>	Угол внутреннего трения грунта/сваи в градусах
<i>TAND</i>	Угол дилатансии в градусах
<i>KSIG</i>	Значение бокового давления
<i>K0-t, K1-t, K2-t, K3-t</i>	Постоянные свойства сечения грунтового основания в поперечном (тангенциальном) направлении в кН/м
<i>P0, P1, P2, P3</i>	Факторы внешних переменных

P_{max}

Максимальное значение характеристики в начале и в конце глубины залегания грунтового слоя в кН/м

4.4 Обзор характеристик и типов поперечного сечения

Обычно (*ECHO SECT YES*) все свойства сечения выводятся в конце каждого расчета. В отчетной документации используются следующие сокращения:

Статические свойства сечения

<i>No</i>	Номер сечения
<i>Mat</i>	Номер материала поперечного сечения
<i>MNs</i>	Номер материала армирования
<i>A</i>	Область сечения
<i>It</i>	Момент инерции относительно оси закручивания
<i>Ay/Az/Ayz</i>	Области сдвиговых деформаций
<i>Iy/Iz/Iyz</i>	Область действия момента инерции
<i>ys/zs</i>	Координаты центра тяжести
<i>ysc/zsc</i>	Координаты центра сдвига
<i>modulus</i>	Модуль упругости и сдвига
<i>g</i>	Удельный вес

В случае, когда в расчетную схему были введены все необходимые характеристики (которые заданы для стандартных сечений по умолчанию), они добавляются после каждого номера поперечного сечения автоматически.

После расчета схемы при повторном его запуске пользователь может вывести сводку всех используемых типов сечений при помощи команды *ECHO SYST YES*:

Результирующая таблица всех сечения

<i>No</i>	Номер сечения
<i>Total Length</i>	Полная длина
<i>Total Weight</i>	Общий вес
<i>Max. Length</i>	Максимальная длина
<i>Title</i>	Название

4.5 Свойства поперечного сечения

Если в расчетную схему введена команды *ECHO SECT FULL*, то отчетная документация с дополнительными свойствами выводится для каждого поперечного сечения по отдельности (модули сечения, участки сечения и т. д.).

После копирования свойств поперечного сечения из отчетной документации выводятся главные моменты инерции и положения главных осей.

Свойства каждого элемента составного сечения также выводятся отдельно друг от друга. При анализе поперечных сечений с эффективной шириной также учитываются значения свойств общего сечения неограниченного эффективным (живым) сечением.

Если в расчетную схему материалы вводятся с учетом коэффициентов запаса, то при использовании некоторых методов анализа необходимо, чтобы жесткость сечения была снижена за счет ввода коэффициентов запаса. Учитывая, что в случае составного сечения это привело бы к совершенно другим результирующим значениям, в программу была введена дополнительная таблица, в которой приводятся проектные значения характеристик сечений.

При составлении подробной отчетной документации по сечениям необходимо знать, относится ли данный отчет к повторному перерасчету системы. Это связано с тем, что при выводе документации после перерасчета на листах отображаются только новые сечения. Однако даже в этом случае можно вывести все сечения, используя команду *ECHO SDEF FULL*.

Ниже приведены характеристики, которые выводятся в отчетную таблицу дополнительных свойств сечения:

Дополнительные статические свойства сечения

<i>alfa-T</i>	Коэффициент температурного расширения
<i>ymin, ymax</i>	Максимальные и минимальные координаты сечения (относительно центра тяжести)
<i>zmin, zmax</i>	
<i>hymin, hzmin</i>	Минимальное плечо силы для арматуры, работающей на сдвиг

<i>AK</i>	Ядро сечения для расчета скручивания
<i>AB</i>	Площадь поперечного сечения бетона для коэффициентов армирования
<i>Mol</i>	Номер материала соединительной арматуры
<i>1/WT</i>	Максимальное напряжение сдвига при действии момента кручения 1
<i>1/WT2</i>	Максимальное напряжение сдвига при действии вторичного момента кручения 1
<i>1/WVy</i>	Максимальное напряжение сдвига при действии сдвигового усилия $VY=1$
<i>1/WVz</i>	Максимальное напряжение сдвига при действии сдвигового усилия $VZ=1$

Таблица характеристик сечения при его депланации:

Характеристики сечения при его короблении

<i>Wmin</i>	Минимальное значение депланации
<i>Wmax</i>	Максимальное значение депланации
<i>CM</i>	Модуль депланации
<i>CMS</i>	Модуль депланации при сдвиге
<i>ASwyу</i>	Интеграл области депланации $w \cdot y \cdot y$
<i>ASwzz</i>	Интеграл области депланации $w \cdot z \cdot z$
<i>ry</i>	Размеры сечения $(l_{yyy} + l_{yzz}) / l_{yy} - 2y_m$
<i>rz</i>	Размеры сечения $(l_{zzz} + l_{yzz}) / l_{zz} - 2z_m$

Позднее выводятся таблица эффективных (задействованных) статических свойств и таблица расчетных значений сечения:

Эффективные статические свойства сечения

<i>Mat</i>	Номер материала поперечного сечения
<i>MNs</i>	Номер материала армирования
<i>A</i>	Область сечения

I_t	Момент инерции относительно оси закручивания
$A_y/A_z/A_{yz}$	Области сдвиговых деформаций
$I_y/I_z/I_{yz}$	Область действия момента инерции
y_s/z_s	Координаты центра тяжести
<i>modulus</i>	Модуль упругости и сдвига
g	Удельный вес

Расчетные значения характеристик сечения

Mat	Номер материала поперечного сечения
MNs	Номер материала армирования
A	Область сечения
I_t	Момент инерции относительно оси закручивания
$A_y/A_z/A_{yz}$	Области сдвиговых деформаций
$I_y/I_z/I_{yz}$	Область действия момента инерции
y_s/z_s	Координаты центра тяжести
<i>modulus</i>	Модули упругости и сдвига
g	Удельный вес

Полные значения пластических внутренних усилий выводятся для стальных или составных (композитных) сечений с учетом параметров, введенных в составе команды *STEE*.

Расчетные усилия и моменты

$N [kN]$	Осевое усилие
$V_y [kN]$	Усилие сдвига
$V_z [kN]$	
$M_t [kNm]$	Момент кручения
$M_y [kNm]$	Изгибающий момент
$M_z [kNm]$	
$y [m]$	Пластический центр тяжести
$z [m]$	

BUCK

Кривые деформации изгиба по направлению осей y и z или *COMB* для идентификации комбинаций

В таблице отображаются следующие состояния сечения:

<i>C</i>	нормативные значения характеристик на стадии пластичности
<i>E</i>	нормативные значения на упругой стадии (до достижения предела текучести)
<i>D</i>	расчетные значения на стадии пластичности
<i>F</i>	расчетные значения на упругой стадии

Первая строка содержит отдельные усилия и моменты (точки *A* и *B* диаграммы взаимодействия). За пластическими усилиями следуют значения в точке *C*, обозначенные как *COMB*. (Для большинства составных сечений точка *C* на кривой взаимодействия равняется двойному значению осевого усилия в точке *B*.)

Если значения прочности материала на растяжение и на сжатие не равны между собой, то данные значения будут иметь противоположные знаки. В это же время сдвиговое усилие и крутящие моменты основаны на абсолютно другом прочностном свойстве материала.

Если в расчетную схему была введена предварительно напряженная арматура, то внутренние усилия, возникающие из-за действия предварительного напряжения, выводятся в отчетную документацию.

В дополнительную таблицу включены выходные данные проекта. Параметры *thet-p*, *thet-y*, *thet-z* и *thet-yz*, представленные в отчетной документации, характеризуют массы, умноженные на моменты инерции (= момент инерции масс).

Дополнительные данные проекта

<i>Mat</i>	Номер материала (только в составных сечениях)
<i>Periphery-O/I</i>	Внешняя и внутренняя площадь
<i>Deff</i>	Эффективная толщина при ползучести и усадке

<i>t-min</i>	Минимальная толщина плиты в мм
<i>t-max</i>	Максимальная толщина плиты в мм
<i>SMP</i>	Прибавка веса для мелких элементов в процентах
<i>thet-p</i>	Момент инерции масс $\rho \cdot (I_y + I_z) = \rho \cdot I_p$
<i>thet-y</i>	$\rho \cdot I_y$
<i>thet-z</i>	$\rho \cdot I_z$
<i>thet-yz</i>	$\rho \cdot I_{yz}$

Если в расчетную схему было введено армирование, то отчет по каждому укрепленному слою включает в себя общую площадь арматуры, верхний и нижний пределы армирования элемента и центр тяжести армирования.

Характеристик армирования

<i>Layer</i>	Номер слоя
<i>mS</i>	Номер материала сечения
<i>mR</i>	Номер материала армирования
<i>area</i>	Общая площадь арматуры
<i>lower-A</i>	Нижний предел армирования = 0 в особых позициях арматуры = минимальное значение при минимальной позиции = максимальное значение следующего нижнего предела в случае последовательной нумерации позиций
<i>upper-A</i>	Верхний предел армирования
<i>yL</i>	Координаты центра тяжести слоя
<i>zL</i>	
<i>L-tors</i>	Эффективность кручения Если позиция арматуры установлена с учетом коэффициента (фактора) 1.0, то арматура, воспринимающая напряжения от действия кручения, рассчитывается отношением $area/L-tors$ (см ² /м)

<i>N-p</i>	Статически определенное предварительное напряжение от действия осевого усилия
<i>M-p</i>	Статически определенное предварительное напряжение от действия момента

4.6 Элементы поперечного сечения

В дополнение к характеристикам поперечного сечения с помощью *ECHO SECT FULL* также выводятся его отдельные элементы. Большинство этих элементов уже известны пользователю (см. используемые команды ввода). Если в расчетную схему введены токи привязки (исходные точки), то все эти привязки будут отображены в отчетной документации при помощи команды *ECHO REFP FULL* в соответствующих таблицах.

Многоугольник или многоугольные отверстия

<i>Id</i>	Номер точки многоугольника
<i>Mat</i>	Номер материала
<i>eff</i>	Эффективность (- = неэффективность)
<i>y</i>	Координаты многоугольника
<i>Z</i>	
<i>r</i>	Радиус закругления кромки
<i>1/WMy, Mz</i>	Инверсии модулей сечения при изгибе M_y и M_z (формула Суэйна/Swain's)
<i>1/WT</i>	Напряжение сдвига от действия момента кручения $M_t=1.0$
<i>1/WVy, 1/WVz</i>	Напряжение сдвига от действия сдвигового усилия V_y или $V_z=1.0$ Сплошное сечение: первый ряд = τ_{xy} , второй ряд = τ_{xz} Тонкостенное сечение: первый ряд = 0, второй ряд = τ
<i>W0</i>	Значение депланации
<i>exp</i>	Класс экспозиции или степень контакта с внешней средой

Прямоугольное сечение/тавровая балка (*T-beam*)

<i>H/B</i>	Высота и ширина
<i>Ho/Bo</i>	Высота и ширина верхней части сечения

<i>Aso/Asu</i>	Армирование внизу/вверху
<i>As-type</i>	Тип распределения арматуры
<i>Do/Du/Ds</i>	Диаметр арматурного стержня вверху/внизу/по кромке сечения
<i>So/Su/Ss</i>	Расстояние армирования вверху/внизу/по кромке сечения
<i>a/a-min/a-max</i>	Расстояние между арматурными стержнями
<i>B-eff</i>	Ширина эквивалентного полого сечения
<i>incl</i>	Наклон соединительного элемента, работающего на сдвиг
<i>Ass</i>	Площадь соединительного элемента, работающего на сдвиг

Круглые/кольцевидные сечения

<i>Ra</i>	Внешний радиус
<i>Ri</i>	Внутренний радиус
<i>Rsa</i>	Радиус внешнего армирования
<i>Rsi</i>	Радиус внутреннего армирования
<i>Asa</i>	Внешнее армирование
<i>Asi</i>	Внутреннее армирование
<i>D</i>	Диаметр арматуры
<i>a</i>	Расстояние между арматурными стержнями

Трубы/кабели

<i>D</i>	Номинальный (наружный) диаметр
<i>T</i>	Толщина стенки трубы
<i>Type</i>	Тип кабеля/троса
<i>strands</i>	Номер кабеля/жилы
<i>wire</i>	Количество отдельных проводов в жиле кабеля
<i>W*100</i>	Весовой коэффициент
<i>C</i>	Площадь составного участка сечения или

	коэффициент заполнения сечения, или площадь металлической части сечения
<i>K</i>	Разрушающее усилие или коэффициент крутки нити, или прочности на разрыв
<i>ke</i>	Коэффициент потери
<i>Zr,k/Zr,d</i>	Разрушающая нагрузка

В следующей таблице отображены дополнительные характеристики для кабельных (нитяных) элементов:

Круглые элементы (жилы)

<i>Id</i>	Обозначение элемента
<i>Mat</i>	Номер материала
<i>ym</i>	Расстояние от жилы до общего центра тяжести кабеля
<i>zm</i>	
<i>R</i>	Радиус жилы
<i>exp</i>	Класс экспозиции

Прокатный профиль

<i>D [mm]</i>	Высота профиля
<i>B [mm]</i>	Ширина профиля
<i>s [mm]</i>	Толщина стенки профиля
<i>t [mm]</i>	Толщина полки профиля
<i>r [mm]</i>	Радиус перехода стенка-полка
<i>yr [mm]</i>	Координаты точки привязки профиля в пределах сечения
<i>zr [mm]</i>	
<i>[grd]</i>	Вращение

Плоскость для расчета сдвига

<i>Id.</i>	Номер сечения
<i>Type</i>	Тип сечения <i>WEB/WRED</i> Стенка профиля с/без области сдвига 3

	<i>FLAN/FFUL</i> Полка профиля с/без области сдвига 3
<i>Mat</i>	Номер материала участка сечения
<i>beta</i>	Параметр трения в области соединения (шве)
<i>mune</i>	Коэффициент трения в области соединения (шве)
<i>y-A/z-A</i>	Координаты участка сечения
<i>y-E/z-E</i>	
<i>b0/bt</i>	Ширина сечения/эффективная ширина
<i>1/WTm/1/WTd</i>	Эквивалентные модули напряжений при кручении
<i>DVy/FVz</i>	Коэффициент пропорциональности при действии сдвигающего усилия
<i>Ns/Ms</i>	Боковое изгибающее внутреннее усилие
<i>MoR</i>	Номер материала соединительной арматуры
<i>Lay</i>	Слой соединительной арматуры
<i>Asl</i>	Минимальное значение соединительной арматуры
<i>beta</i>	Наклон стержней соединительной арматуры по отношению к оси соединяемой арматуры

Места вывода напряжений в плоскости сдвига

<i>Id.</i>	Обозначение точки вывода
<i>Mat</i>	Номер материала
<i>y</i>	Координаты точки вывода
<i>z</i>	
<i>1/WT</i>	Напряжения сдвига от действия момента кручения $Mt=1.0$
<i>1/WVy/1/WVz</i>	Напряжение сдвига от действия сдвигового усилия Vy или $Vz=1.0$ Сплошное сечение: первый ряд = τ_{xy} , второй ряд = τ_{xz} Тонкостенное сечение: первый ряд = 0, второй ряд = τ
<i>sig-t</i>	Напряжение в поперечном направлении

$1/WT/1/WT2$	Напряжение сдвига от действия $MT=1.0$ или $MT2=1.0$
$1/WVy/1/WVz$	Напряжение сдвига от действия $VY=1.0$ или $VZ=1.0$
xS	Значение расстояния изгиба между конечными точками в условных единицах относительно длины плиты

Одиночная арматура

$Id.$	Обозначение арматуры
Mat	Номер материала армирования
y	Координаты расположения арматуры
z	
T	Температуры
$sigma$	Преднапряжение
As	Исходное (базовое) значение минимального армирования
$As-max$	Максимальное армирование
Lay	Номер слоя
D	Диаметр
a	Расстояние между стержнями
Ar	Обозначенная область для анализа ширины раскрытия трещин

Распределение арматуры или соединительные элементы, работающие на сдвиг

$Id.$	Обозначение арматуры
Mat	Номер материала армирования
No	Координаты расположения арматуры
ya/za	Координаты начальной точки линейного армирования
ye/ze	Координаты конечной точки линейного армирования
As	Исходное (базовое) значение минимального

	армирования
<i>As-max</i>	Максимальное армирование
<i>Lay</i>	Номер слоя
<i>D</i>	Диаметр
<i>a</i>	Расстояние между стержнями
<i>Ar</i>	Обозначенная область для анализа ширины раскрытия трещин
<i>Dist</i>	Распределение арматурных стержней

Армирование по окружности

<i>Id.</i>	Обозначение арматуры
<i>Mat</i>	Номер материала армирования
<i>ym/zm</i>	Координаты центра армируемой области
<i>R</i>	Радиус армированной области
<i>As</i>	Исходное (базовое) значение минимального армирования
<i>As-max</i>	Максимальное армирование
<i>Lay</i>	Номер слоя
<i>D</i>	Диаметр
<i>a</i>	Расстояние между стержнями
<i>Ar</i>	Обозначенная область для анализа ширины раскрытия трещин
<i>Dist</i>	Распределение арматурных стержней

4.7 Коэффициенты ветрового воздействия

Параметры ветрового воздействия, задаваемые в составе команды **WPAR**, выводятся следующим образом (**ECHO WIND YES**):

Армирование по окружности

<i>CS</i>	Номер этапа возведения
<i>rel.roughnss</i>	Относительная шероховатость
<i>iceing</i>	Толщина ледового покрова
<i>traffic</i>	Высота дополнительной зоны ветрового воздействия из-за движения транспортных средств
<i>y-min</i>	Размеры зоны ветрового воздействия
<i>y-max</i>	
<i>z-min</i>	
<i>z-max</i>	

Таблица коэффициентов ветрового воздействия выводится для стальных профилей (запись **PROF**) или в случае их явного ввода в расчетную схему в составе команды **WIND**:

Гидродинамические коэффициенты для учета ветровой и волновой нагрузок

<i>alpha</i>	Угол приложения нагрузки
<i>cw-y</i>	Коэффициент бокового сопротивления
<i>cw-z</i>	Коэффициент подъемной силы
<i>cw-t</i>	Коэффициент крутильных колебаний
<i>ref</i>	Заданные размеры
<i>c-m</i>	Гидродинамический коэффициент
<i>c-lat</i>	Коэффициент поперечной силы
<i>Strohal</i>	Число Струхаля
<i>a-gallop</i>	Коэффициент галопирования

4.8 Метод интегральных уравнений

Результаты анализа топологии сечений при использовании метода интегральных уравнений представлены в следующей таблице:

Определение геометрии сечения за счет решения системы интегральных уравнений

<i>Reg</i>	Область
<i>edge</i>	Номер кромки (границы)
<i>node-a</i>	Начальный узел
<i>node-b</i>	Конечный узел
<i>M</i>	Номер площади
<i>MNo</i>	Номер материала
<i>Conn.</i>	Примечание для соединительной кромки
<i>YA, ZA</i>	Координаты начала
<i>YE, ZE</i>	Координаты конца

4.9 Характеристики пружинных элементов и их зависимости

С помощью команды *SFLA* пользователь может собственноручно задать нелинейную зависимость для усилий или моментов для каждого пружинного элемента расчетной схемы. Все характеристики пружинных элементов выводятся в отчетную документацию при помощи команды *ECHO SPRI YES*:

Пользовательская функция зависимости усилий и деформаций

<i>Number</i>	Номер пружинной характеристики
<i>U [mm]</i> или [<i>mrad</i>] или [<i>o/oo</i>] или [<i>1/km</i>]	Перемещения или вращение или деформации или изгиб (кривизна, закругление)
<i>Typ</i>	Заданный тип линии <i>TYPE</i> отображается в этой строке

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. U.J. Wienecke. Zur wirklichkeitsnahen Berechnung von Stahlbeton- und Spannbetonstäben nach einer konsequenten Theorie II.Ordnung unter allgemeiner Belastung. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt, 1985.
2. C. Katz. Self-Adaptive Boundary Elements for the Shear Stress in Beams. BETECH 86, Boundary Element Technology Conference 1986 Massachusetts Institute of Technology, Cambridge U.S.A., 1986.
3. D. Schade. Zur Berechnung von Querschnittswerten und Spannungsverteilungen für Torsion und Profilverformungen von prismatischen Stäben mit dünnwandigen Querschnitten. Z. Flugwiss.Weltraumforschung 11 , 167-173., 1987.
4. P.W. Rowe. “The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact”. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 269.1339 (1962), pp. 500–527.
5. M.M. Maksimovi'c. Mehanika Tla. Gradjevinska knjiga, 1995.
6. M. Wehnert. “Ein Beitrag zur drainierten und undrainierten Analyse in der Geotechnik”. PhD thesis. Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, 2006.
7. M.A. Chrisfield. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Volume I, Essentials. Wiley & Sons, 1991.
8. M.A. Chrisfield. Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures. Volume II, Advanced Topics. Wiley & Sons, 1997.
9. O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor. The Finite Element Method, volume 2. McGraw Hill, London., 1991.
10. O.C. Zienkiewicz and I.C. Corneau. Visco-Plasticity - Plasticity and Creep in Elastic Solids - a Unified Numerical Solution Approach. In International Journal for Numerical Methods in Engineering, volume 8, 1974, pp. 821–845.
11. H.B. Kupfer and K.H. Gerstle. “Behavior of concrete under biaxial stresses.” In: Journal of the Engineering Mechanics Division 4 (1973), pp. 853–866.

12. Fédération internationale du Béton. fib Model Code for Concrete Structures 2010. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2013. ISBN: 978-3-433-03061-5.
13. R.L. Kondner and J.S. Zelasko. A hyperbolic stress strain relation for sands. Proc. 2nd Pan. Am. I-COSFE Brazil 1, 1963, pp. 289–394.
14. J.M. Duncan and C.Y. Chang. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 96, 1970, pp. 1629–1653.
15. O.K. Søreide. “Mixed hardening models for frictional soils”. PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology, 2003.
16. T. Schanz. Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien. Habilitationsschrift, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, 1998.
17. T. Benz. “Small-strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences”. PhD thesis. Universität Stuttgart, Institut für Geotechnik, 2006.
18. C.S. Desai and J.T. Christian. Numerical Methods in Geotechnical Engineering. Chapter 2, McGraw-Hill Book Company, 1973.
19. P. Wittke-Gattermann. Verfahren zur Berechnung von Tunneln in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. Dissertation RWTH-Aachen, Verlag Glückauf, 1998.
20. W. Wittke. Grundlagen für die Bemessung und Ausführung von Tunneln in quellendem Gebirge und ihre Anwendung beim Bau der Wendeschleife der S-Bahn Stuttgart. Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH-Aachen, 1978.
21. W. Wittke and P. Rissler. Bemessung der Auskleidung von Hohlräumen in quellendem Gebirge nach der Finite Element Methode. Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH-Aachen - Heft 2, 1976, pp. 7–46.

22. Baugrund-Institut. Nichtlineare Stoffgleichungen für Böden und ihre Verwendung bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben. Mitteilungen Heft 10 des Baugrund Instituts Stuttgart, 1979.
23. K. Terzaghi. Theoretical Soil Mechanics. Wiley, 1948.
24. D.M. Potts and L. Zdravkovi'c. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory. Vol. 1. Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering. Thomas Telford, 1999.
25. A.W. Skempton. "The pore-pressure coefficients A and B". In: Géotechnique 4 (4 1954), pp. 143–147.
26. A. Verruijt. Grondmechanica. Delftse Uitgevers Maatschappij, 1983.
27. P.V. Lade. Failure Criterion for Frictional Materials in Mechanics of Engineering Materials. Chap 20 (C.s.Desai,R.H.Gallagher ed.) Wiley & Sons, 1984.
28. C. Galliot and R. Luchsinger. "A simple non-linear material model for PVC-coated polyester fabrics". In: Tensinews Newsletter 18 (2010).