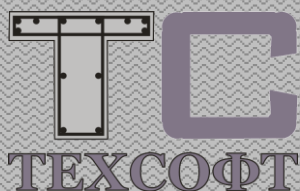


2021

Краткое знакомство со СтаДиКон

Шарниры в программном комплексе
конечно-элементных расчетов.
Часть 1. Редакция 1.



Техсофт
30.06.2021



Пособие составлено сотрудниками ООО «Техсофт» - ведущим российским разработчиком программного обеспечения для архитектурно-строительного проектирования совместно с фирмами **mb AEC Software GmbH** и **Kretz Software GmbH (Германия)** представляющей сертифицированную систему архитектурно-строительного проектирования **Ing+**, реализующую сквозную технологию проектирования строительных конструкций. Данный документ описывает работу с версией 2021 года. Представленный набор инструментов может отличаться в более ранних версиях. Пособие не является полной документацией и не описывает все возможности программных средств.

Более подробная информация о программных продуктах представлена на сайте www.tech-soft.ru

Коллектив авторов:

Семенов В.А.

Лебедев В. Л.

Шевелев С.А.

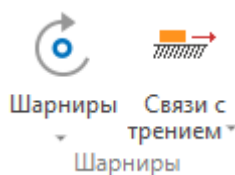
разработчик: **ООО "ТЕХСОФТ"**
www.tech-soft.ru, тел/факс +7 (495) 960 22 83, e-mail: support@tech-soft.ru

Оглавление

Оглавление	3
1 Введение	4
2 Функции шарниров	5
2.1 Просмотр шарниров.....	5
2.2 Редактирование шарниров.....	7
3 Типы шарниров	9
3.1 Элементные шарниры	9
3.2 Узловые шарниры.....	15
3.3 Новые узловые шарниры	15

1 Введение

В конечно-элементных проектах обычные **шарниры** моделируются освобождением связей по одной или нескольким степеням свободы между элементом и принадлежащим ему узлом конечно-элементной схемы. Таким образом, перемещение элемента с **шарниром** в узле отличается от перемещений других элементов, примыкающих к этому узлу (отметим, что при отсутствии **шарниров** перемещения всех элементов, примыкающих к узлу одинаковы). В более сложных случаях связь освобождается не полностью, а есть некоторый закон, который устанавливает зависимость между усилием в **шарнире** и взаимным перемещением узла и отсоединенного от него элемента. Так можно моделировать **шарниры** с пружиной, упругопластические **шарниры**, односторонние шарниры и т. д. Для использования **шарниров** перейдите на вкладку **Связи** в программном обеспечении **СтаДиКон**.

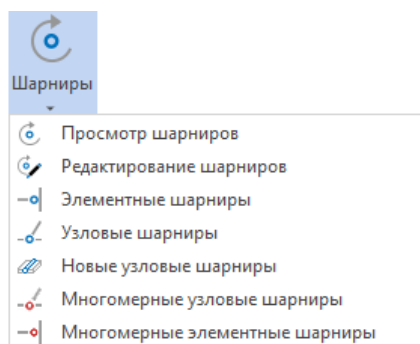


В программе реализовано несколько видов и подвидов **шарниров**, которые моделируют ряд способов соединения элементов в конструкциях:

- простые шарниры;
- шарниры с пружиной;
- односторонние шарниры;
- упругопластические шарниры;
- шарниры с внутренним трением;
- шарниры с ограниченными взаимными перемещениями.

2 Функции шарниров

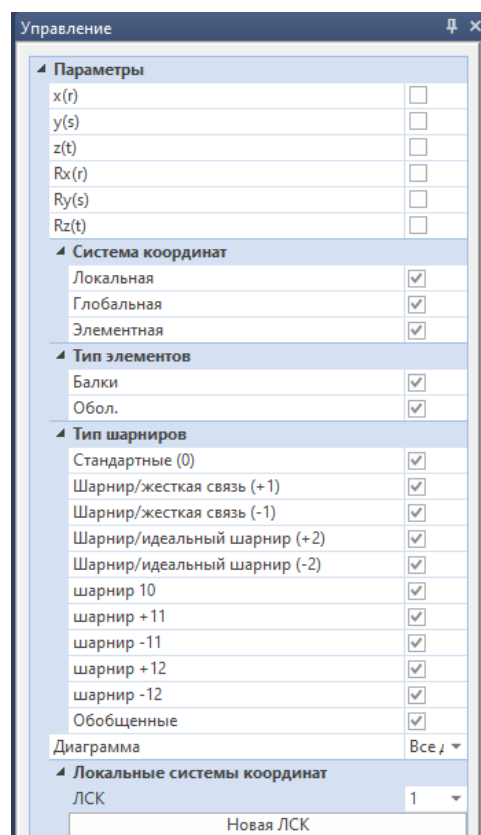
Кнопка **Шарниры** является вариативной и, в зависимости от выбранной функции, позволяет осуществить **просмотр**, **редактирование** и **ввод** шарниров различных типов.



2.1 Просмотр шарниров

Данная операция служит для просмотра **шарниров**, имеющих в проекте (**элементных, узловых, новых узловых**).

При выборе этой операции, на экране появляется диалог **Управление**:



Параметры.

$x(r)$, $y(s)$, $z(t)$, $Rx(r)$, $Ry(s)$, $Rz(t)$ определяют степени свободы шарниров:

- $x(r)$, $y(s)$, $z(t)$ - задают перемещения вдоль осей **OX**, **OY** и **OZ** соответственно;
- $Rx(r)$, $Ry(s)$, $Rz(t)$ - задают повороты вокруг этих осей.

Система координат.

Локальная, Глобальная, Элементная (система координат элемента) определяют тип системы координат, в которой заданы просматриваемые шарниры.

Тип элементов.

Балки, Обол. определяют тип конечных элементов (балочные или оболочечные), для которых показываются шарниры.

Тип шарниров.

Стандартные (0) - обычный двусторонний шарнир;

Шарнир/жесткая связь (+1/-1), Шарнир/идеальный шарнир (+2/-2) – односторонние шарниры. В зависимости от усилий, действующих в шарнире, и взаимных перемещений элемента с шарниром, и системы, шарниры либо включаются, либо выключаются.

Шарнир 10, шарнир +11, шарнир -11, шарнир +12, шарнир -12.

Обобщенные – шарнир, в котором может быть задана более сложная зависимость между усилием и относительным перемещением в шарнире.

Диаграмма.

Выпадающий список, позволяющий выбрать диаграмму работы обобщенных шарниров.

Локальные системы координат. Данный выпадающий список позволяет последовательно просмотреть существующие локальные системы координат всего проекта и шарниры, заданные в них (если они имеются).

При визуализации шарниров всех видов, на экране изображаются только те шарниры, степени свободы, тип и система координат которых соответствуют активным в данный момент опциям каждой из перечисленных выше групп.

В рабочем окне, степени свободы узловых и элементных шарниров изображаются при помощи кодирования числами. Изображаемое число образуется в результате суммирования для каждой степени свободы шарнира числа 2, возведенного в степень:

0	для перемещения вдоль глобальной оси x (или локальной r)
1	для перемещения вдоль глобальной оси y (или локальной s)
2	для перемещения вдоль глобальной оси z (или локальной t)
3	для поворота вокруг глобальной оси x (или локальной r)
4	для поворота вокруг глобальной оси y (или локальной s)
5	для поворота вокруг глобальной оси z (или локальной t)

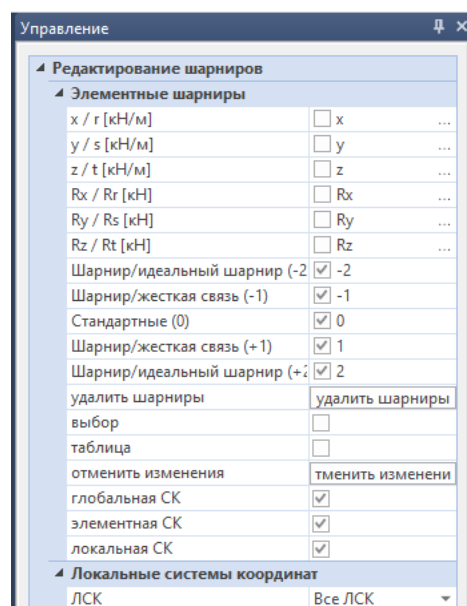
Например, если установлен шарнир для поворота вокруг оси OZ, то будет показано число 32: 2 в степени 5 = 32.

Если установлены шарниры для поворота вокруг оси OX и для поворота вокруг оси OZ, то будет показано число 40: 2 в степени 3 = 8, 2 в степени 5 = 32, 32 + 8 = 40.

Узловые шарниры при этом изображаются желтыми кружочками с красными цифрами, а элементные - красными кружочками с белыми цифрами.

2.2 Редактирование шарниров

При выборе опции **редактирование шарниров**, на экране появляется диалог следующего вида:



Редактируются **элементные шарниры** в стержнях и оболочках. Возможно изменение типа **системы координат**, выборочное **удаление** какой-либо степени свободы, **изменение** типа шарнира, а также редактирование **жесткости** шарнира.

Кроме того, возможно **удаление** выбранных степеней свободы для шарниров в видимом фрагменте.

Все указанные операции можно проводить как в графической, так и в табличной форме.

В графическом режиме, редактирование осуществляется указанием соответствующих опций и выбором шарниров рамкой.

При активизации опции **таблица**, вызывается табличный редактор **Элементные шарниры**.

Элементные шарниры

номера узлов только изображенные

x/r y/s z/t Rx/Rr Ry/Rs Rz/Rt выбор однородных

№	элемент	узел	показ	ЛСК	степень свободы	тип	жесткость
1	2	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	0	0
2	5	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	0	1e+06
3	7	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	1	0
4	12	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	1	1e+06
5	13	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	-1	0
6	18	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	-1	1e+06
7	19	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	2	1e+06
8	20	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	2	0
9	25	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	-2	1e+06
10	26	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	-2	0
11	35	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	-2	0
12	36	2	<input type="checkbox"/>	глобальная (0)	Rx	-2	1e+06

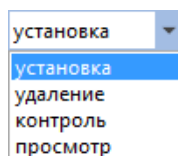
подсказки

Можно удалить степень свободы, изменить тип шарнира и системы координат. Жесткость шарнира можно заменить новым значением, или старое значение умножить на новое или сложить с ним. Сделанные в таблице изменения вступают в силу после нажатия кнопки **применить**.

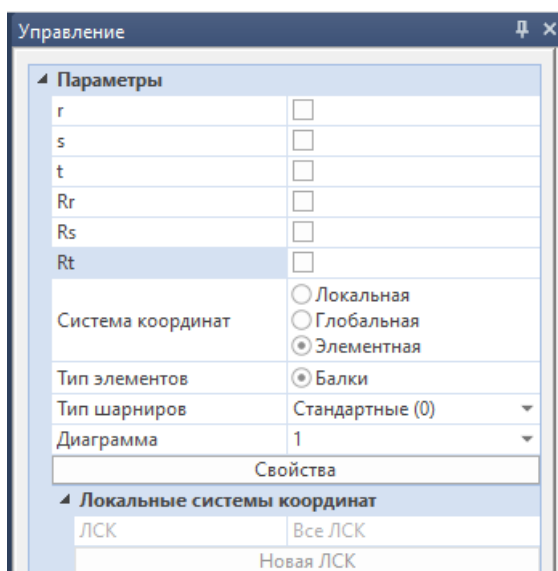
3 Типы шарниров

3.1 Элементные шарниры

Для любого элемента конечно-элементного проекта могут быть определены элементные шарниры. Такие шарниры рекомендуется использовать, в основном, для стержневых систем.



Установка. При выборе операции **установка**, на экране появляется окно свойств для установки элементных шарниров:

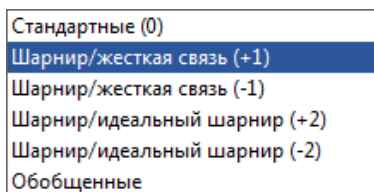


Параметры. Выбираются степени свободы шарниров (допускается многократный выбор, т. е. можно задать сразу несколько степеней свободы).

Система координат. Выбирается система координат, в которой будет задаваться шарнир).

Тип элементов. Указывается тип элементов, для которых будут устанавливаться шарниры.

Тип шарниров. Выбирается тип шарниров.



Элементные шарниры характеризуются тремя параметрами:

- степени свободы, по которым освобождаются связи;
- жесткость;
- тип.

Степени свободы. На экране шарнир обозначается красным кружком, внутри которого проставлено число, обозначающее, по каким степеням свободы установлен шарнир.

Система координат. Элементные шарниры могут задаваться в глобальных координатах, локальных координатах и в локальной системе координат элемента (элементной системе координат).

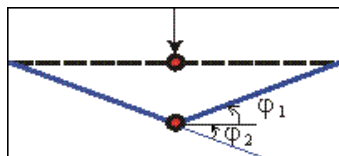
Жесткость. Жесткость шарнира s характеризует зависимость между усилием в шарнире F взаимным перемещением элемента и узла u : $F = su$.

Если жесткость равна 0 , то элемент полностью отсоединен от узла (речь идет только о той степени свободы, по которой установлен шарнир).

Если жесткость не равна 0 (упругий шарнир), то элемент присоединен к узлу пружиной.

Перемещение u вычисляется следующим образом - из перемещения элемента, в узле которого установлен шарнир, вычитается перемещение системы в этом узле. Перемещения приведены к той системе координат, в которой задан шарнир.

Пример:



Здесь между двумя стержнями установлен упругий шарнир относительно поворота вокруг глобальной оси z (направлена на нас). Пунктиром изображено исходное положение системы, непрерывными линиями - положение системы после приложения нагрузки. Здесь взаимный поворот определяется как: $u = \varphi_2 + \varphi_1$, а момент в шарнире будет равен $M = su$.

Жесткость s измеряется в [кН/м], для поступательных степеней свободы, и в [кН · м/рад], для вращательных степеней свободы.

Тип. Тип шарнира показывает, является ли он двусторонним или односторонним.

Различаются следующие типы шарниров: **0, +1, -1, +2, -2, обобщенные.**

Шарнир типа **0** — это обычный двусторонний шарнир. Остальные типы — это односторонние шарниры. В зависимости от усилий, действующих в шарнире, и взаимных перемещений элемента с шарниром, и системы, шарниры либо включаются, либо выключаются.

Следующая таблица показывает, как работают шарниры различных типов:

Тип	Жесткость	Шарнир включен	Шарнир выключен
0	$c = 0$	Элемент отсоединен от системы	Невозможно (шарнир включен всегда)
0	$c > 0$	Элемент присоединен к системе через пружину	Невозможно (шарнир включен всегда)
+1/-1	$c = 0$	Элемент отсоединен от системы	Элемент жестко связан с системой
+1/-1	$c > 0$	Элемент присоединен к системе через пружину	Элемент отсоединен от системы
+2/-2	$c = 0$	Элемент отсоединен от системы	Элемент жестко связан с системой
+2/-2	$c > 0$	Элемент присоединен к системе через пружину	Элемент жестко связан с системой

Знаки '+' и '-' определяют условия включения и выключения шарнира. Процесс поиска решения для системы с односторонними шарнирами - итеративный. За нулевое приближение берутся результаты линейного расчета (все шарниры включены).

Применяется следующий алгоритм:

- вычисляются относительные перемещения элемента с шарнирами, то есть из перемещений элемента с шарнирами вычитаются перемещения системы (если шарнир выключен, и элемент жестко связан с системой, то относительные перемещения нулевые).

- затем вычисляются силы в узлах элемента, то есть из произведения матрицы жесткости на вектор перемещений вычитается вектор элементных нагрузок (силы могут быть нулевыми, если элемент в данный момент отсоединен от системы).

Если шарнир выключен, а элемент жестко связан с системой, и при этом знак силы совпадает со знаком типа шарнира, шарнир вновь включается.

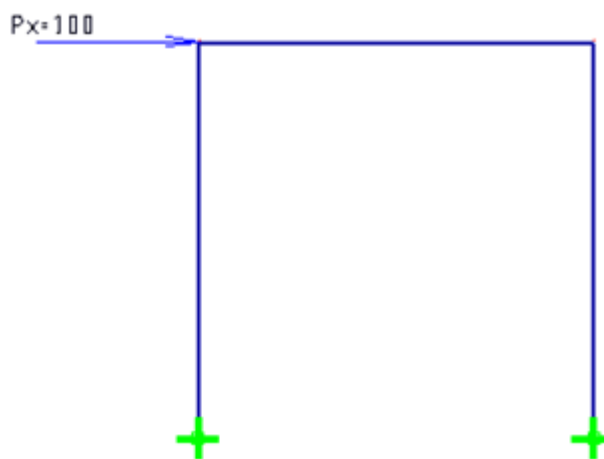
В других случаях, если тип шарнира **+1/+2**, и относительные перемещения больше нуля шарнир включается. Если тип шарнира **-1/-2**, и относительные перемещения меньше нуля, то шарнир выключается. То есть имеется полная аналогия со схемой включения/выключения упругих опор. Если шарнир упругий, то на процесс включения/выключения шарниров влияет знак силы, действующей в пружине, которая соединяет элемент с соседними элементами.

Примечание. Для учета односторонности работы шарнира, требуется проводить нелинейный расчет. При этом в параметрах расчета необходимо включать опцию **Нелинейные шарниры**.

Если опция расчета **Нелинейные шарниры** не была включена, то поведение шарниров типа **+1/-1** и **+2/-2** полностью идентично поведению шарниров типа **0**. Шарниры типа **0** ведут себя одинаково как при линейном, так и при нелинейном расчете.

Пример

Рассмотрим раму, на которую действует горизонтальная нагрузка, и в горизонтальном стержне которой задан один шарнир вокруг оси **z** (направлена перпендикулярно от экрана).



Меняя характеристики шарнира, посмотрим, как изменятся эпюры моментов для системы.

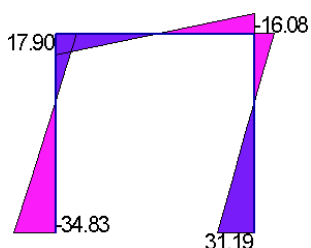


Рисунок 1

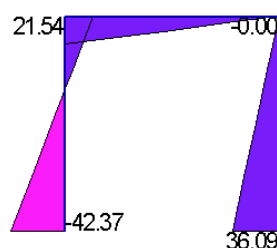


Рисунок 2

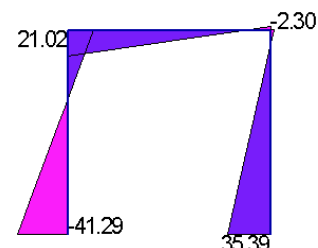


Рисунок 3

На **рисунке 1** приведена эпюра моментов для случая, когда шарнир не задан.

Рисунок 2 соответствует случаю, когда задан простой двусторонний шарнир (тип **0**, жесткость равна **0**). Видно, что в шарнире момент обращается в **0**. Взаимные повороты стержней не ограничены.

На **рисунке 3** приведена эпюра моментов для упругого двустороннего шарнира (жесткость равна 10000 [кНм/рад]). Момент в шарнире не равен нулю, но он меньше, чем для случая, когда шарнира нет вообще.

Остальные рисунки соответствуют односторонним шарнирам. Проводился нелинейный статический расчет с включенной опцией **Нелинейные шарниры**.

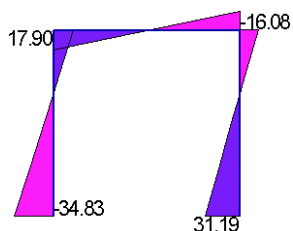


Рисунок 4

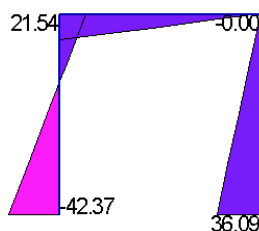


Рисунок 5

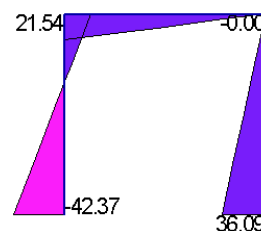


Рисунок 6

На **рисунке 4** приведена эпюра моментов для шарнира типа **+1** с нулевой жесткостью. Так как знак относительных перемещений в шарнире не совпадает с типом шарнира, шарнир выключен. То есть элемент жестко связан с системой - эпюра совпадает с **рисунком 1**. Для шарнира типа **+2** с нулевой жесткостью мы получим такой же результат.

На **рисунке 5** приведена эпюра для шарнира типа **-1** с нулевой жесткостью. Так как знак относительных перемещений в шарнире совпадает с типом шарнира, шарнир включен. То есть элемент отсоединен от системы, момент в шарнире равен нулю - эпюра совпадает с **рисунком 2**. Для шарнира типа **-2** с нулевой жесткостью мы получим такой же результат.

На **рисунке 6** приведена эпюра для шарнира типа **+1** с жесткостью 10000 [кНм/рад]. Так как знак относительных перемещений в шарнире не совпадает с типом шарнира, шарнир выключен. Элемент отсоединен от системы - эпюра совпадает с **рисунком 2**.

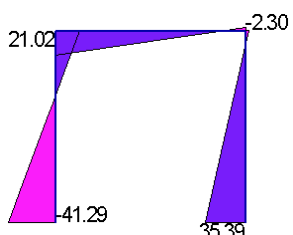


Рисунок 7

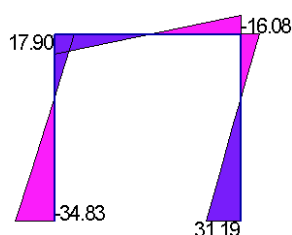


Рисунок 8

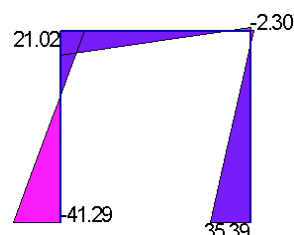


Рисунок 9

На **рисунке 7** приведена эпюра для шарнира типа **-1** с 10000 [кНм/рад]. Так как знак относительных перемещений в шарнире совпадает с типом шарнира, шарнир включен. Элемент присоединен к системе через пружину - эпюра совпадает с **рисунком 3**.

На **рисунке 8** приведена эпюра для шарнира типа **+2** с жесткостью 10000 [кНм/рад]. Так как знак относительных перемещений в шарнире не совпадает с типом шарнира, шарнир выключен. Элемент жестко присоединен к системе - эпюра совпадает с **рисунком 1**.

На **рисунке 9** приведена эпюра для шарнира типа **-2** с жесткостью 10000 [кНм/рад]. Так как знак относительных перемещений в шарнире совпадает с типом шарнира, шарнир включен. Элемент присоединен к системе через пружину - эпюра совпадает с **рисунком 3**.

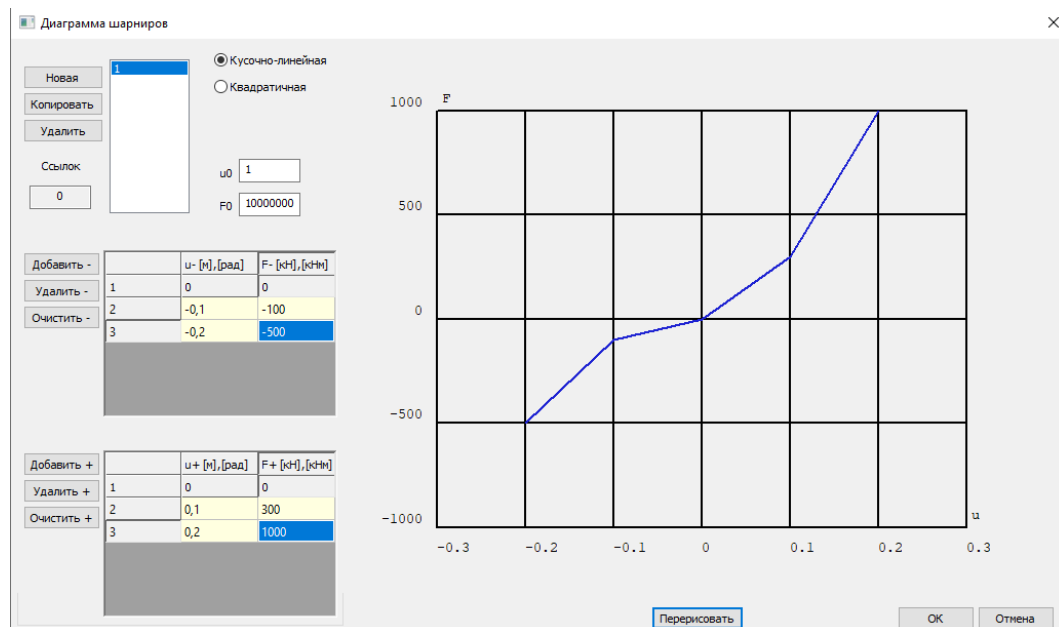
Ссылка на архив примера:

http://www.tech-soft.ru/doc/metodichka_sharniri2021.mbpma

Таким образом, реализованы все возможные пары состояний односторонних связей: жесткая связь/шарнир, жесткая связь/пружина, шарнир/пружина.

Обобщенные шарниры позволяют задавать зависимость между усилием и относительным перемещением в шарнире с помощью **диаграмм шарниров**. Возможно задание двух вариантов зависимости: кусочно-линейная и кусочно-квадратичная. При выборе **обобщенных шарниров** в окне **управление** нажмите кнопку свойства. Откроется окно **Диаграмма шарниров**.

Для задания диаграммы необходимо выбрать соответствующий тип шарнира и нажать на кнопку **Свойства**.



В данном окне можно задавать диаграммы зависимости перемещения от нагрузки. **Левая ветвь** отвечает за отрицательные перемещения и нагрузки, **Правая ветвь** соответственно за положительные. После задания значений для левой и правой ветвей, с помощью кнопки **Перерисовать**, получаем диаграмму шарниров.

Примечание. Диаграмма работы учитывается при расчете только при включении опции **Односторонние шарниры**. Процесс расчета итеративный. По относительному перемещению в шарнире, определяются усилие в шарнире и касательная жесткость, которые используются на следующей итерации. В качестве нулевого приближения выбирается перемещение, полученное для линейного расчета. Отметим, что в областях текучести и разрушения сходимость расчета не гарантирована.

Удаление. Операция **удаление** позволяет удалить шарниры с установленными в окне **Управление** степенями свободы, системами координат, для заданных типов элементов и заданного типа шарниров.

Контроль. При выборе операции **контроль**, для установленных шарниров осуществляется проверка 3-х видов:

Проверка 1. В одном элементе все шарниры должны быть заданы в одной и той же системе координат (в глобальной, локальной или в системе координат элемента).

Проверка 2. Узлы проверяются на совместимость их шарниров. Если установка шарниров в каком-либо узле элемента приводит к тому, что узел перемещается как жесткое целое, то выводится сообщение об ошибке, и узел маркируется как ошибочный.

Проверка 3. Применяется только для стержневых элементов. Стержни проверяются на совместимость их концевых шарниров. Не допускается такой выбор шарниров в начале и конце элемента, который полностью освобождает его от связи с конечно-элементной моделью и приводит к тому, что после установки шарниров, стержень перемещается как жесткое целое. При наличии таких стержней выдается сообщение об ошибке, а стержень маркируется в рабочем окне.

Примечание. Функция не проверяет, является ли система устойчивой в целом.

Просмотр. При выборе операции **просмотр**, на экране появляется окно свойств для просмотра элементных шарниров, в котором можно выбрать необходимые параметры, систему координат, тип элементов, тип шарниров, диаграммы обобщенных шарниров и локальные системы координат.

3.2 Узловые шарниры

Узловые шарниры работают аналогично элементным. Узловые шарниры, как следует из названия, привязываются к узлу и моделируют ситуацию, когда все примыкающие к этому узлу элементы могут перемещаться относительно друг друга. То есть, если к узлу примыкает n элементов, то узловой шарнир эквивалентен установке $n-1$ элементных шарниров в этом узле.

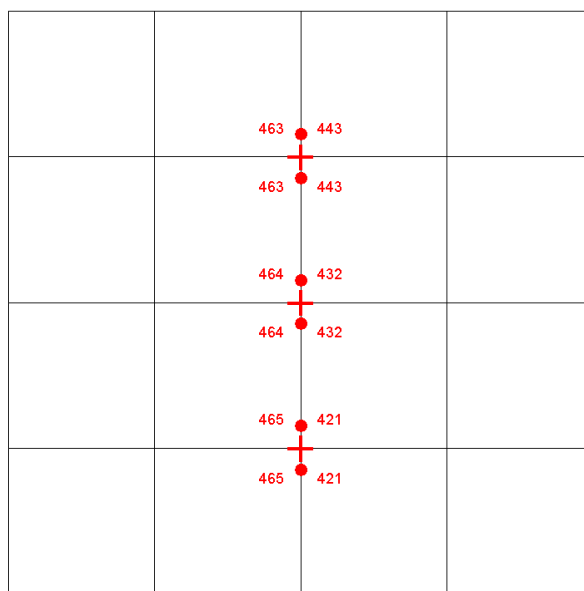
Узловые шарниры могут быть заданы в глобальной и локальной системах координат. Все параметры узловых шарниров задаются аналогично элементным шарнирам типа **0**.

Типы **+1**, **-1**, **+2**, **-2** для узловых шарниров не поддерживаются.

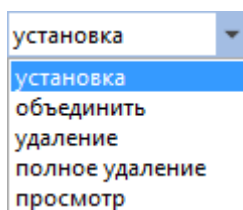
Примечание. Не допускается использование узловых шарниров в задачах на поиск собственных значений (задачах на определение форм собственных колебаний системы и задачах устойчивости).

3.3 Новые узловые шарниры

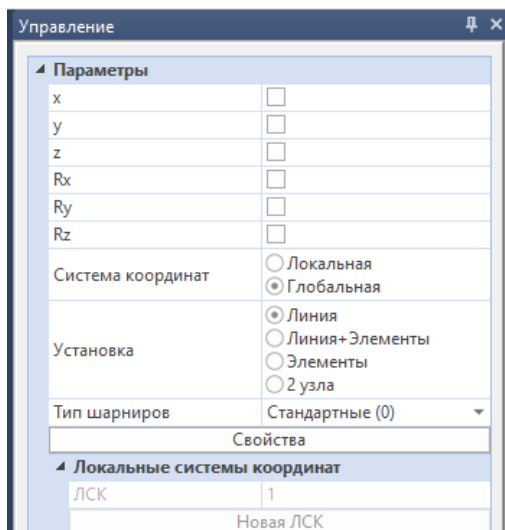
"Новые" узловые шарниры позволяют продублировать узел в соседних элементах (два узла с разными номерами, но с одинаковыми координатами). Элементы как бы разрываются в тех узлах, где устанавливаются новые узловые шарниры (на приведенном рисунке установлены новые узловые шарниры типа **0** с нулевыми жесткостями в направлениях **OX** и **OY**).



Перемещения этих дублирующих узлов полностью совпадают, за исключением тех степеней свободы, по которым установлены шарниры. "Новые" узловые шарниры предназначены, в первую очередь, для работы с плитами, оболочками и балками-стенками.



Установка. При выборе операции **установка**, на экране появляется окно свойств для установки "новых" узловых шарниров:



Опции **Линия**, **Линия+Элементы** и **Элементы** определяют режим установки новых шарниров.

При установке новых шарниров в режиме **Линия**, задается только линия, вдоль которой элементы «разрезаются». Элементы, в которых узел сохраняется, и элементы, в которых номер узла вдоль линии разреза заменяется новым, определяются автоматически.

При наличии в проекте объемных элементов (3D-элементов), опция **Линия** заменяется опцией **Плоскость**.



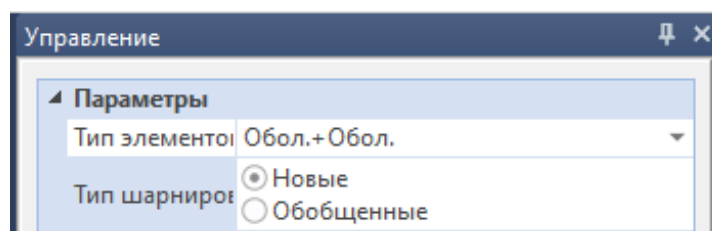
Пользователь задает 3 точки плоскости. Порядок определения точек (по часовой стрелке/против часовой стрелки) определяет направление вектора нормали к плоскости. Вектор будет направлен таким образом, чтобы порядок обхода точек, при направлении взгляда с конца вектора, был против часовой стрелки. Узлы элементов, расположенных в положительном направлении нормали, дублируются, в отрицательном - сохраняются.

В режиме **Линия+Элементы** пользователь сначала задает линию разреза, затем сам определяет две группы элементов: одну, в которых узлы сохраняются, вторую, в которой узлы дублируются (следуя указаниям строки состояния).

В режиме **Элементы** пользователь может «отсоединить» только один элемент. Для этого необходимо задать элемент, а затем в выбранном элементе указать узел, который дублируется. Описание остальных параметров приводится выше, при описании узловых и элементных шарниров.

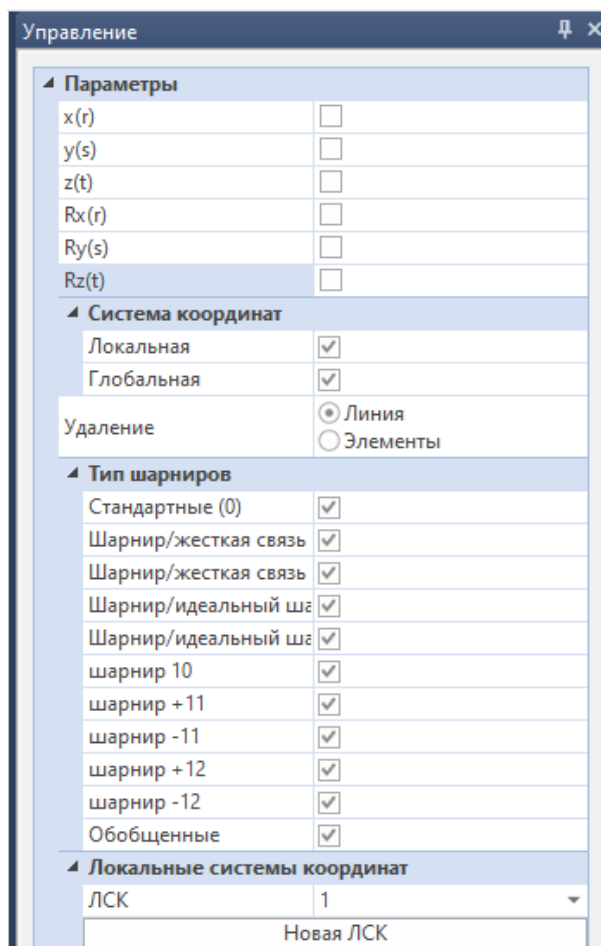
Объединить. Данная операция позволяет объединить узлы в 2-х элементах, где определен новый шарнир.

При выборе операции **объединить**, на экране появляется диалог следующего вида:



В результате операции объединения номер узла в 1-ом элементе меняется на номер узла во 2-ом элементе. Сначала необходимо указать узел в 1-ом элементе, который будет изменен, а затем - узел во 2-ом элементе, номер которого присваивается узлу в 1-ом элементе.

Удаление. При выборе операции **удаление**, на экране появляется диалог следующего вида:



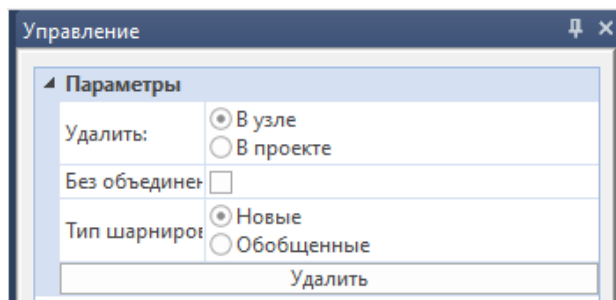
Для удаления новых узловых шарниров используются 2 альтернативных режима: **Линия** и **Элементы**.

В режиме **Линия**, необходимо задать линию. После чего все двойные, узлы (т. е. новые шарниры), лежащие на этой линии, будут удалены. В этом режиме можно удалять шарниры в определенных направлениях и шарниры указанных типов, соответствующие активным опциям диалога **Управление**.

В режиме **Элементы** необходимо задать элемент и указать узел элемента, в котором новый шарнир удаляется. В этом режиме шарнир удаляется по всем направлениям, для которых он определен (все эти направления должны быть активны в диалоге **Управление**).

Полное удаление. Данная операция позволяет более корректным способом удалить все новые шарниры и двойные узлы в отмеченных узлах или во всем проекте целиком.

При выборе операции **полное удаление**, на экране появляется диалог следующего вида:



Полное удаление новых узловых шарниров осуществляется в одном из альтернативных режимов: **В узле** или **В проекте**.

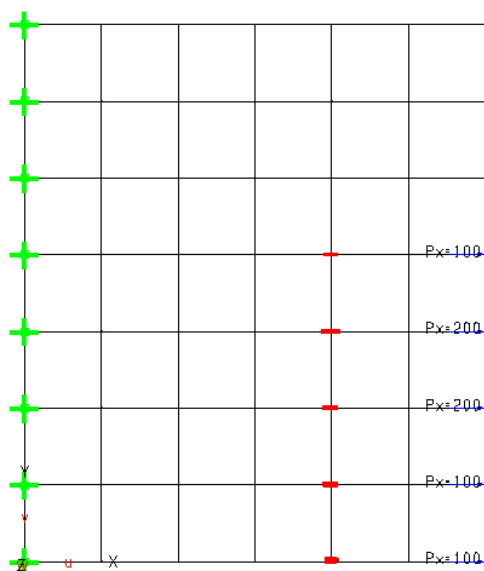
Для режима **В узле** дополнительно помечает в рабочем окне узлы для удаления новых шарниров. Для удаления необходимо нажать на кнопку **Удалить**.

Примечание. В режиме фрагмента (когда видим не весь проект) режим **В проекте** не работает.

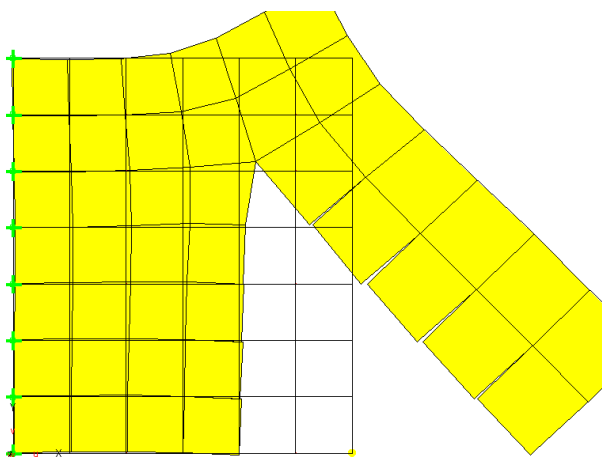
Убедиться в корректности удаления новых шарниров можно, включив режим просмотра номеров узлов (опция **номера узлов** вкладки **Вид**). Если в узле есть новый шарнир, то в одной точке высвечиваются два номера. Если шарнира нет, то номер - один. В этом режиме удаляются все новые шарниры (во всех направлениях и всех типов).

Использование обычных шарниров в оболочечных системах не позволяет адекватно смоделировать ситуацию с разделением системы на две части вдоль какой-либо линии.

Рассмотрим плоскую систему, закрепленную по левому краю. По правому краю приложим нагрузку в направлении оси x (красными линиями обозначены узловые шарниры по глобальной оси x).

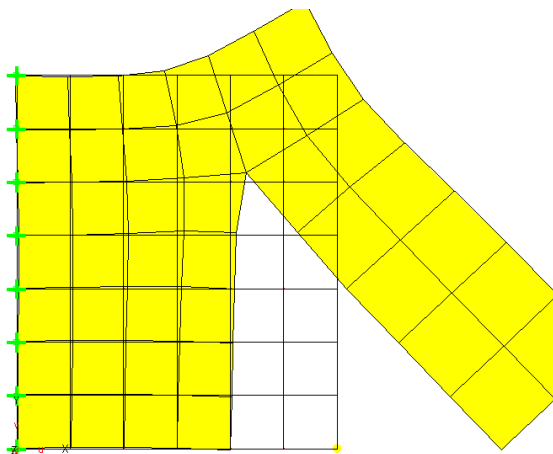


В результате расчета мы получим следующую картину деформирования системы:



На рисунке видно, что непрерывность перемещений по x нарушена не только в соседних элементах, находящихся по разные стороны линии разреза, но и в элементах, находящихся по одну сторону этой линии.

"Новые" узловые шарниры лишены этого недостатка. При их использовании получается следующая картина:



Жесткости и типы для "новых" узловых шарниров. Для "новых" узловых шарниров реализованы все те же возможности, что и для элементных шарниров, за исключением того, что шарнир не может быть задан в элементной системе координат.

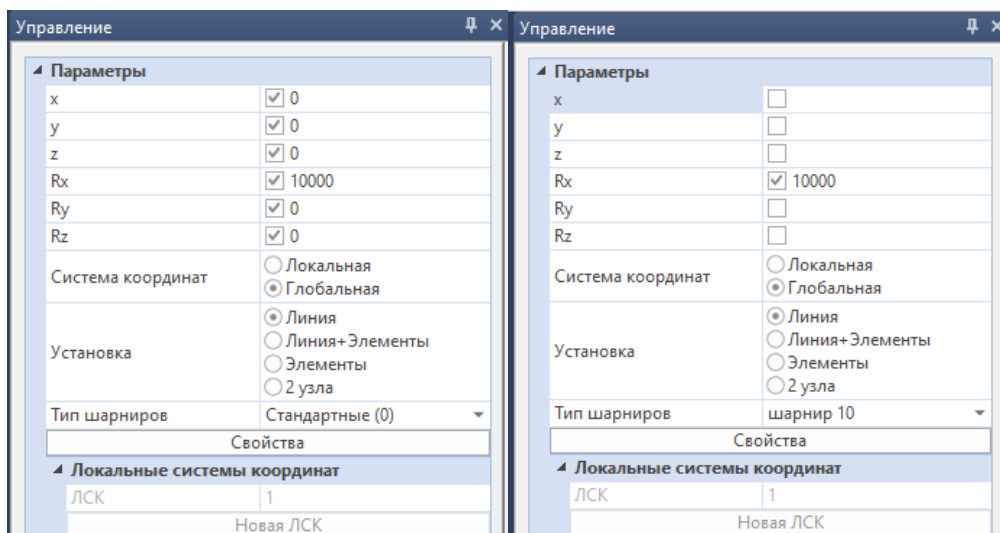
При работе с односторонними шарнирами (типы **+1, -1, +2, -2**), для определения относительного перемещения в шарнире, используется следующее правило: **из перемещения первого узла шарнира вычитается перемещение второго узла шарнира**. Обычно, первый узел в шарнире — это узел с меньшим номером. Более точно это определяется при просмотре системы в табличном виде.

Для упрощения задания нелинейных шарниров с жесткостью заданной по определенным степеням свободы и шарнирами типа 0 по оставшимся введены шарниры типа **10, +11/-11, +12/-12**.

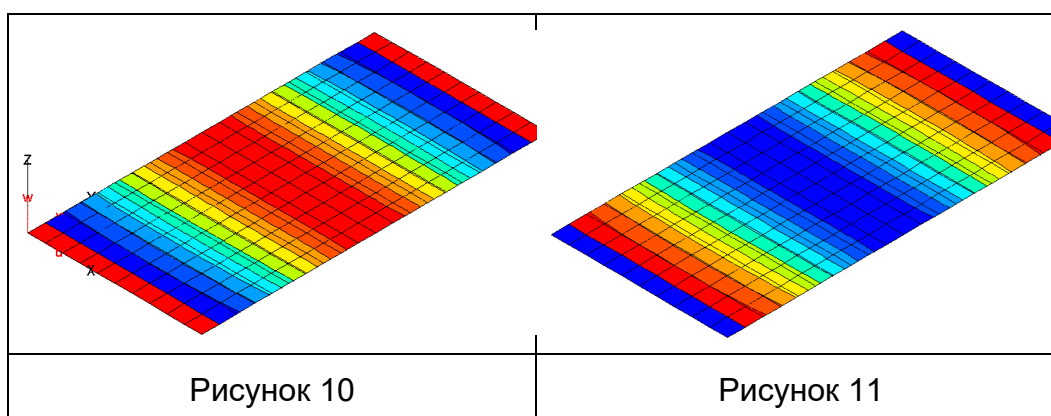
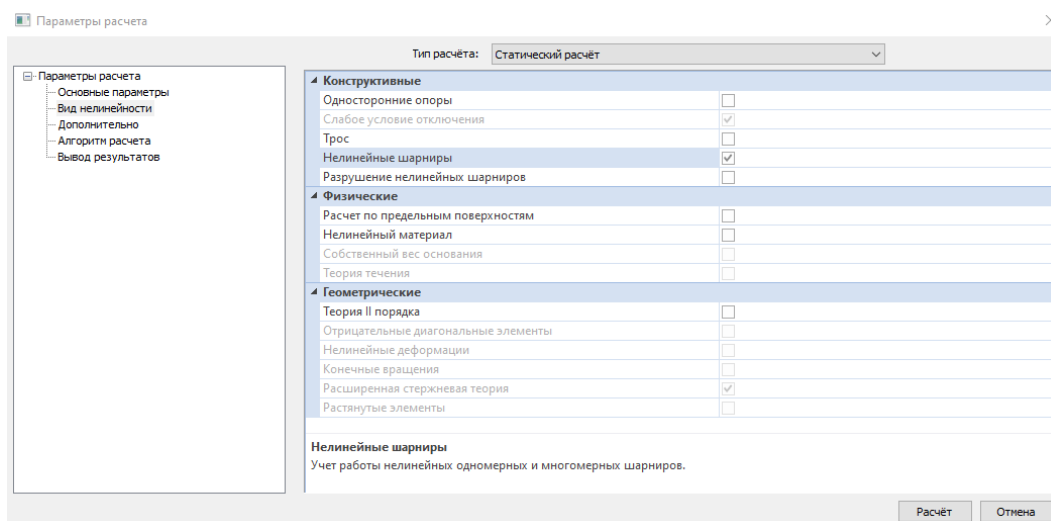
Шарнир 10 задает по всем степеням свободы шарниры типа 0, кроме выбранных с заданной степенью свободы. В случае необходимости задания жесткости только в одной степени свободы, шарнир 10 задаст жесткость только в выбранной и задаст в оставшихся шарниры типа 0.

Пример:

Рассмотрим пластины, на которые действует равномерно-распределенные нагрузки, и зададим шарниры типа 0 по всем степеням свободы и шарниры 10, с заданной жесткостью.



Следует учитывать, что при задании жесткости шарниров следует в окне **Расчет** выбирать функцию **Нелинейные шарниры**.



На рисунке 10 равномерно-распределенная нагрузка направлена, относительно оси координат, положительно. Жестко закреплены края и центр пластины. Шарниры типа 0 и типа 10 разрежали пластину и получили идентичные результаты прогиба.

На рисунке 11 равномерно-распределенная нагрузка направлена, относительно оси координат, отрицательно. Результаты так же идентичны.

Шарниры типа +11/-11, +12/-12 – это шарниры, работающие по аналогии с шарниром типа 10. В случае необходимости задания жесткости только в одной степени свободы и задания шарнира +1, шарнир +11 задаст жесткость только в выбранной и задаст в оставшихся шарниры типа 0.

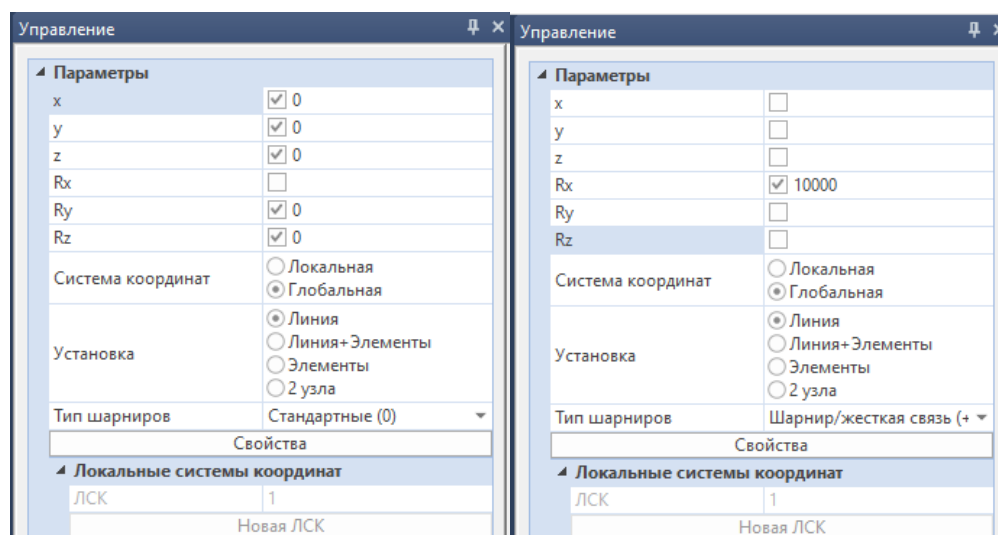
Ссылка на архив примера:

http://www.tech-soft.ru/doc/metodichka_sharniri2021.mbpma

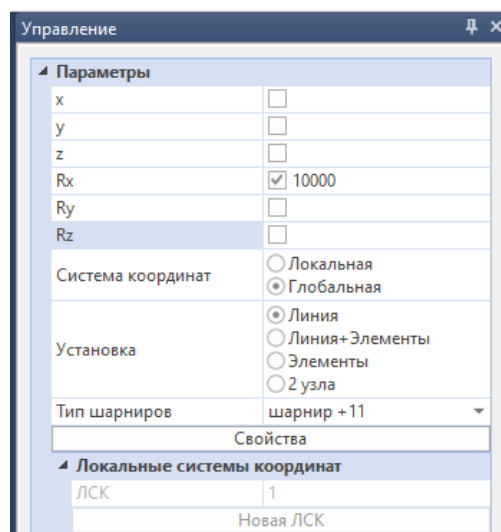
Пример:

Рассмотрим пластины, на которые действует равномерно-распределенные нагрузки, и зададим шарниры типа +1 по одной степени свободы (по оставшимся шарниры типа 0) и шарниры +11, с заданной жесткостью.

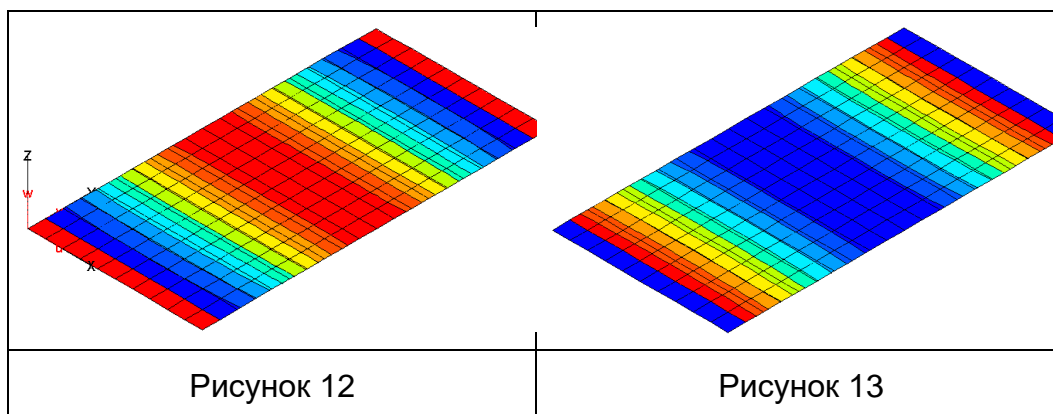
Заданные связи для шарнира типа +1:



Заданные связи для шарнира +11:



Следует учитывать, что при задании жесткости шарниров следует в окне **Расчет** выбирать функцию **Нелинейные шарниры**.



На рисунке 12 равномерно-распределенная нагрузка направлена, относительно оси координат, положительно. Жестко закреплены края и центр пластины. Шарниры типа +1 и типа +11 разрежали пластину и получили идентичные результаты прогиба.

На рисунке 13 равномерно-распределенная нагрузка направлена, относительно оси координат, отрицательно. Результаты так же идентичны.

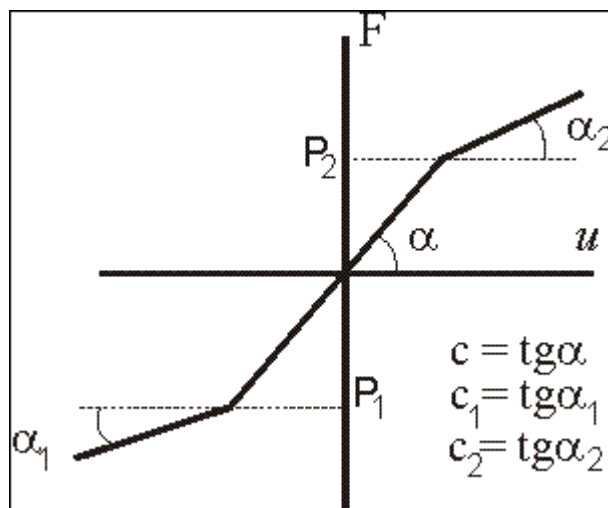
Ссылка на архив примера:

http://www.tech-soft.ru/doc/metodichka_sharniri2021.mbpma

Для "новых" шарниров предусмотрены расширенные возможности, которые позволяют моделировать пластические, упругопластические шарниры и шарниры с ограниченными перемещениями. Для использования этих возможностей должны быть заданы дополнительные параметры.

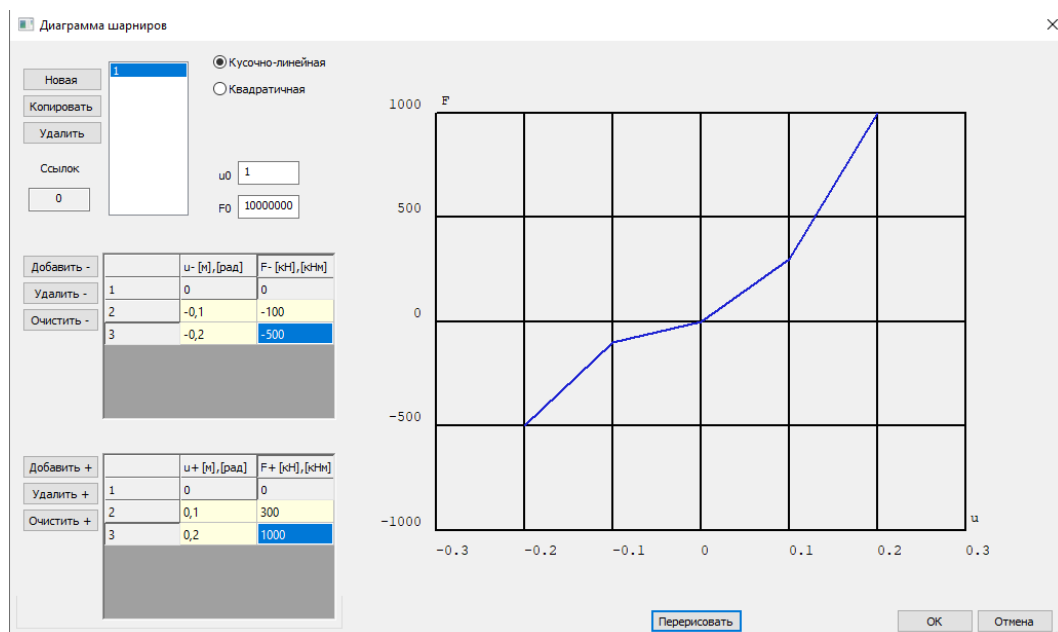
Шарнир с ограниченными перемещениями — это шарнир типа **2** (знак типа в данном случае не имеет значения). Задаются 2 дополнительных параметра: **$u1$** и **$u2$** (размерность [**м**] или [**рад**]). Относительное перемещение в шарнире должны находиться внутри интервала [**$u1$** , **$u2$**]. При выходе значения перемещения за границы интервала - шарнир выключается.

Упругопластический шарнир — это тип **1** (знак типа в данном случае не имеет значения). Его поведение описывается пятью параметрами: основная жесткость **c** , дополнительные жесткости **$c1$** , **$c2$** , предельные усилия **$P1$** , **$P2$** . Зависимость между усилиями и перемещениями проиллюстрирована на диаграмме. Для моделирования пластического шарнира требуется задавать очень большое значение жесткости **c** .



Обобщенные шарниры позволяют задавать зависимость между усилием и относительным перемещением в шарнире с помощью **диаграмм шарниров**. Возможно задание двух вариантов зависимости: кусочно-линейная и кусочно-квадратичная. При выборе **обобщенных шарниров** в окне **управление** нажмите кнопку свойства. Откроется окно **Диаграмма шарниров**.

Для задания диаграммы необходимо выбрать соответствующий тип шарнира и нажать на кнопку **Свойства**.



В данном окне можно задавать диаграммы зависимости перемещения от нагрузки. **Левая ветвь** отвечает за отрицательные перемещения и нагрузки, **Правая ветвь** соответственно за положительные. После задания значений для левой и правой ветвей, с помощью кнопки **Перерисовать**, получаем диаграмму шарниров.

Примечание. Диаграмма работы учитывается при расчете только при включении опции **Односторонние шарниры**. Процесс расчета

итеративный. По относительному перемещению в шарнире, определяются усилие в шарнире и касательная жесткость, которые используются на следующей итерации. В качестве нулевого приближения выбирается перемещение, полученное для линейного расчета. Отметим, что в областях текучести и разрушения сходимость расчета не гарантирована.