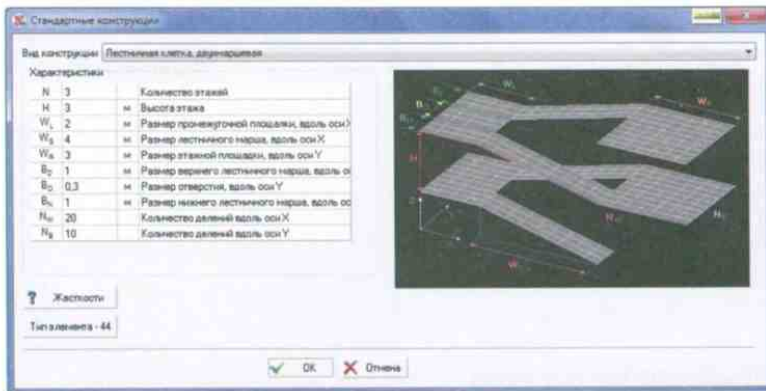


Коноид с направляющей окружностью

### 5.11. Создание стандартных конструкций



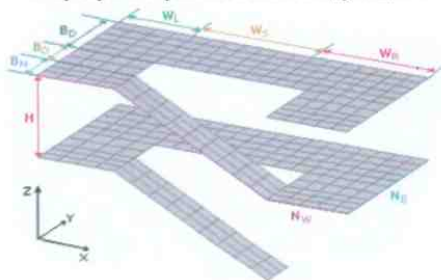
Для стандартных конструкций (подконструкций), достаточно часто используемых в практике проектирования, предусмотрена возможность генерации соответствующих расчетных моделей. Для этого в диалоговом окне **Стандартные конструкции** (рис. 5.11-1) следует из выпадающего списка выбрать тип конструкции, задать геометрические параметры и параметры генерации конечно-элементной сетки.

Рис. 5.11-1. Диалоговое окно **Стандартные конструкции**

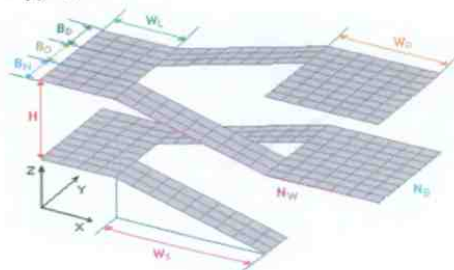
В операции предусмотрена возможность выбора типов конечных элементов и их жесткостных характеристик.

## 5. Создание расчетной схемы

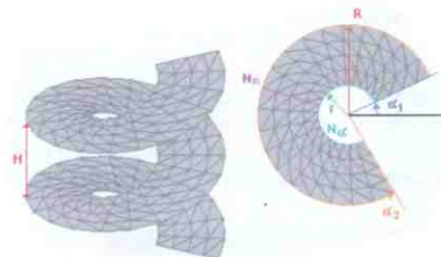
В программе реализованы следующие типы конструкций:



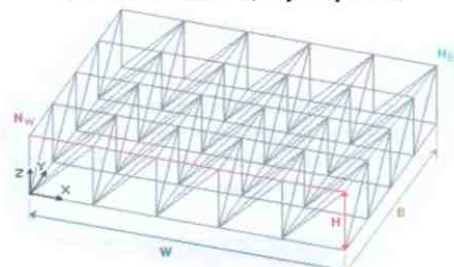
Лестничная клетка, одномаршевая



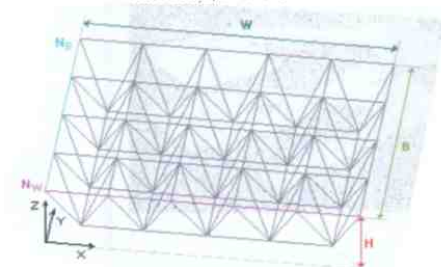
Лестничная клетка, двухмаршевая



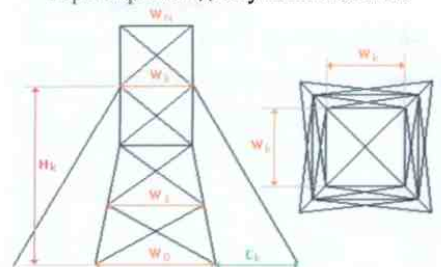
Лестница винтовая



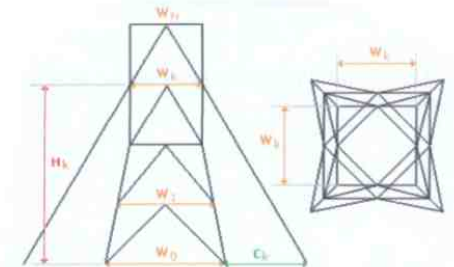
Ферма-крыша



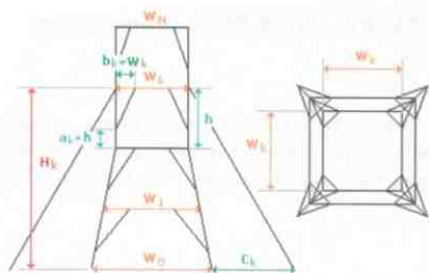
Ферма-крыша сдвинутая на полшага



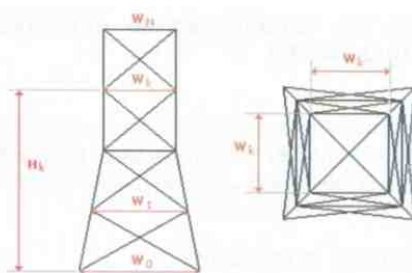
Мачта с диагональными раскосами



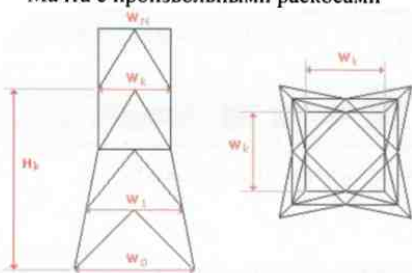
Мачта с раскосами от середины распорки



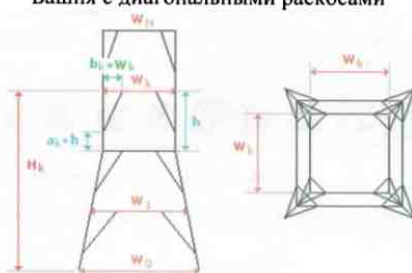
Мачта с произвольными раскосами



Башня с диагональными раскосами



Башня с раскосами от середины распорки



Башня с произвольными раскосами

В приведенном выше списке конструкций для мачт и башен, помимо общих геометрических параметров, предусмотрена возможность добавления/удаления ярусов сооружения; задания различных жесткостей для элементов, расположенных на различных уровнях и задания связей в опорных узлах (см. рис. 5.11-2).

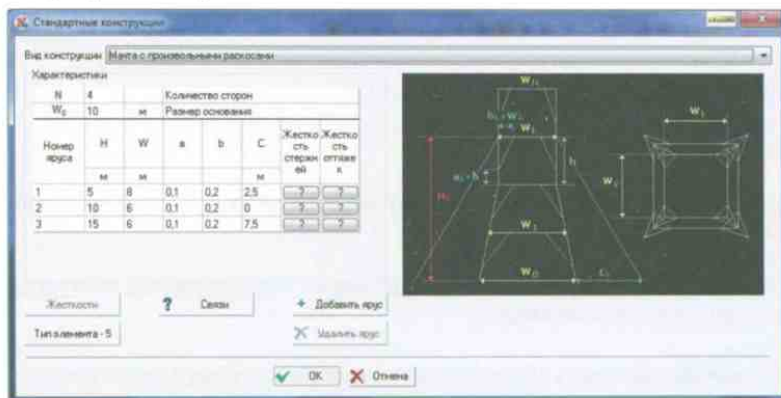


Рис. 5.11-2. Диалоговое окно Стандартные конструкции (мачты и башни)

### 5.12. Формирование произвольной сетки конечных элементов на плоскости



Автоматическая триангуляция замкнутой области произвольной формы на плоскости является одним из наиболее универсальных средств формирования сеток конечных элементов. В комплексе предусмотрена возможность триангуляции как при создании новой схемы, так и триангуляция фрагмента готовой схемы.

#### Основные положения

Операция **Генерация сетки произвольной формы на плоскости** вызывается из раздела **Схема** инструментальной панели. Управление триангуляцией выполняется кнопками, которые объединены в инструментальную панель окна задачи и появляются после инициализации триангуляции (рис. 5.12-1).

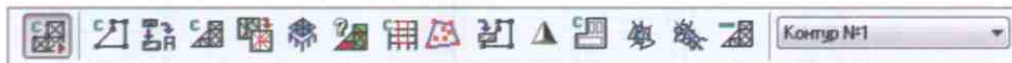


Рис. 5.12-1. Инструментальная панель управления триангуляцией

Назначение кнопок этой панели следующее:



— Задание контура — ввод внешнего и внутренних контуров, ограничивающих область триангуляции;



— Запись результатов триангуляции как подсхемы — сохранение результатов триангуляции в виде отдельного проекта;



— Генерация треугольной сетки конечных элементов на плоскости — назначение параметров и инициализация процесса триангуляции;



— Улучшение качества триангуляции;



— Анализ качества триангуляции;



— Установка результатов триангуляции на место в схеме — присоединение подсхемы, полученной в результате триангуляции, к схеме;



— Преобразование стержней в контур триангуляции — формирование контура триангуляции из предварительно выбранных стержней;



— Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции;



— Сохранение контура триангуляции — назначение имени и запись в проект контура триангуляции;



— Экспорт контура триангуляции в программу GMSH;



— Превращение контурных элементов в контур триангуляции — преобразование элементов, сформированных препроцессором **ФОРУМ**, в контуры для последующей триангуляции;



— Указание узлов сгущения сетки — назначение узлов, в окрестности которых выполняется локальное сгущение сетки;






— Указание линий сгущения сетки — назначение линий внутри контура триангуляции, вдоль которых выполняется сгущение сетки;



— Отказ от результатов триангуляции / сброс контура.

Кроме кнопок в рассматриваемой инструментальной панели находится список контуров, заданных в текущем проекте.

Для триангуляции заданной области необходимо выполнить операции в следующей последовательности:

- нажать кнопку **Задание контура**  и обвести «резиновой нитью» опорные узлы внешнего контура (под «опорными» понимаются узлы, лежащие в угловых точках контура);
- повторить предыдущую операцию для всех внутренних контуров;
- нажать кнопку **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**  и назначить параметры триангуляции в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** (рис. 5.12-5);
- после выхода из диалогового окна нажатием кнопки **ОК** выполняется разбиение заданной области на трехузловые или/и четырехузловые конечные элементы;
- установить область на место в схеме нажатием кнопки  или/и записать ее в виде подсхемы.

После разбиения области триангуляции контур не сбрасывается и можно повторить назначение новых параметров триангуляции и т.д. до тех пор, пока не будет получен удовлетворяющий результат. Контур будет сброшен только после установки области на место в схеме и/или записи ее в виде подсхемы.

## **Ввод контура триангуляции**




Перед тем как выполнить триангуляцию, необходимо задать контур, ограничивающий область триангуляции. Контур задается с помощью замкнутой ломаной линии, проходящей через заранее введенные опорные узлы. Кроме того, в качестве контура можно использовать стержневые элементы, лежащие на границе области триангуляции. Если область триангуляции содержит внутренние области, в которых триангуляция не выполняется (например, отверстия), то каждая из таких областей должна задаваться с помощью «своего» контура.

При вводе контура следует придерживаться следующих правил:

- при вводе участка контура можно не фиксировать узлы, лежащие на прямой, соединяющей опорные узлы. Они будут введены в контур автоматически. Исключением является триангуляция «только на узлах контура», при выполнении которой учитываются только опорные узлы;

- замыкание контура выполняется двойным щелчком мыши после ввода последнего узла или указанием на первый узел;
- не допускается наличие совпадающих узлов как опорных, так и промежуточных. Здесь и далее под «совпадающими» будем понимать узлы, имеющие одинаковые координаты или отстоящие друг от друга на расстояние, которое меньше или равно значению *точности оценки совпадающих узлов*. Эта величина задается в диалоговом окне **Настройка параметров среды**, которое вызывается из одноименного раздела меню **Настройка**;
- не допускается попадание совпадающих узлов внутрь контура;
- не допускается наличие внутри контура узлов (в том числе и принадлежащих другим контурам), лежащих от контура на расстоянии менее 0.15 заданного шага триангуляции. Наличие таких узлов приводит к прерыванию процесса триангуляции из-за появления вырожденных треугольников;
- внутренние контуры не должны пересекать или касаться наружного контура и один другого;
- не допускается наличие контуров, лежащих вне контура, ограничивающего область триангуляции.

Сохранение контура (или нескольких последовательно введенных контуров) выполняется

одноименной кнопкой . Управление сохранением выполняется в диалоговом окне **Сохранение контура триангуляции** (рис. 5.12-2). В этом окне в группе **Операции с контурами** находится ряд кнопок, с помощью которых выполняются следующие операции:

**Добавить контур** — введенный контур или группа контуров записываются в проект под именем, заданным в поле **Имя контура**. Если в указанном поле отсутствует информация, то контур запоминается под именем «**Контур №...**», где номер контура — это порядковый номер в списке введенных контуров.

**Заменить контур** — введенный контур записывается вместо одного из ранее сохраненных контуров. Для выполнения этой операции следует:

- ввести контур;
- выбрать в списке заменяемый контур (его номер и имя появятся в соответствующих полях);
- нажать кнопку **Заменить контур**.

**Заменить имя контура** — имя ранее сохраненного контура меняется на новое. Для выполнения операции следует:

- выбрать любой контур из списка контуров;
- активировать операцию сохранения контура;
- выбрать в списке контур, у которого меняется имя (его номер и имя появятся в соответствующих полях);
- записать в поле **Имя контура** новое имя;
- нажать кнопку **Заменить имя контура**.

**Удалить контур** — из списка контуров удаляется ранее записанный контур. Для выполнения операции следует:

- выбрать любой контур из списка контуров;
- активировать операцию сохранения контура;
- выбрать в списке удаляемый контур;
- нажать кнопку **Удалить контура**.

**Удалить все контуры** — из списка контуров удаляются все ранее записанные контуры. Для выполнения операции следует:

- выбрать любой контур из списка контуров;
- активировать операцию сохранения контура;

– нажать кнопку Удалить все контуры.



**Перечисленные выше операции будут выполнены после выхода из диалогового окна *Сохранение контура триангуляции* (производится нажатием кнопки ОК).**

Если область триангуляции включает несколько внутренних контуров, то их имеет смысл сохранять каждый в отдельности. Поскольку после сохранения контура автоматически выполняется операция **Сброс контура**, то сразу после ее выполнения можно вводить следующий контур.

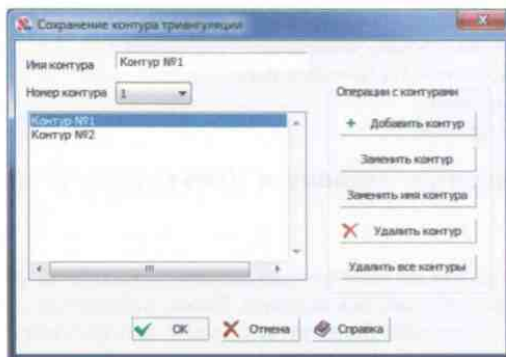



Рис. 5.12-2. Диалоговое окно **Сохранение контура триангуляции**

Если контур был задан некорректно, то его сброс выполняется нажатием кнопки **Отказ от результатов триангуляции** .

Триангуляция не будет выполнена, если активны несколько контуров, принадлежащих разным областям триангуляции. В этом случае перед началом повторного ввода контура необходимо нажатием кнопки **Отказ...** очистить схему от всех контуров и повторить ввод или вызов из списка необходимого контура.

Если область триангуляции задана таким образом, что один или несколько внутренних контуров сохранены в качестве самостоятельных контуров, то первым из списка должен быть обязательно загружен внешний контур, а затем внутренние контуры в произвольном порядке.

### преобразование стержней в контур триангуляции



Стержневые элементы можно использовать для задания контура триангуляции. Для выполнения этой операции необходимо выбрать (отметить) стержни, образующие контур, и нажать на кнопку **Преобразование стержней в контур триангуляции**.

Выбранные стержневые элементы должны отвечать следующим требованиям:

- лежать в одной плоскости;
- иметь ненулевую длину;
- не иметь разрывов, т. е. образовывать замкнутую линию без самопересечений.

Внутренние контуры могут быть образованы как стержневыми элементами, так и с помощью операции **Задание контура** и могут сохраняться отдельно от наружного контура.

Если выбранные стержневые элементы не отвечают перечисленным выше требованиям, появляется сообщение:

«Для выделенных стержней однозначное определение контура невозможно»

### Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции



Контур триангуляции может быть задан как граница выпуклой оболочки отмеченных узлов. Для выполнения этой операции необходимо выбрать (отметить) узлы и нажать на кнопку

#### Преобразование выпуклой оболочки отмеченных узлов в контур триангуляции.

Выбранные узлы должны отвечать следующим требованиям:

- количество узлов должно быть не менее трех;
- лежать в одной плоскости;
- не лежать на одной прямой.

### Превращение укрупненных элементов (объектов) в контур триангуляции



Укрупненные элементы или объекты создаются в препроцессоре **ФОРУМ** и моделируют такие элементы строительных конструкций, как колонны, балки, перекрытия, стены и крыши. Расчетная схема метода конечных элементов формируется путем автоматического преобразования этих объектов в наборы конечных элементов. При этом для преобразования плоскостных объектов (перекрытия, стены и крыши) используется триангуляция.

В программе предусмотрена возможность и неавтоматической триангуляции укрупненных элементов с использованием рассматриваемых операций. В этом случае каждый укрупненный элемент триангулируется в отдельности и его грани рассматриваются как контур (проемы — как внутренние контуры).

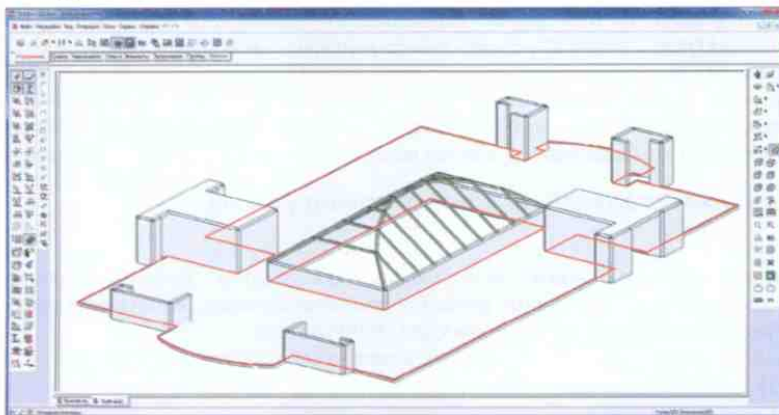



Рис. 5.12-3. Контур триангуляции на основе элемента перекрытия



Параметры жесткости, заданные для объекта, наследуются всеми конечными элементами, полученными в результате триангуляции.

Укрупненные элементы могут иметь произвольные очертания и включать произвольное количество внутренних контуров (проемов), не соприкасающихся друг с другом и не пересекающих внешний контур.

Триангуляция укрупненных элементов выполняется в следующем порядке:

- активировать функцию триангуляции в разделе инструментальной панели **Схема**;
- нажать кнопку **Превращение контурных элементов в контур триангуляции**;
- указанием на любой участок контура, в том числе и внутренний, выбрать необходимый элемент. Выбранный элемент будет выделен цветом (рис. 5.12-3);
- нажать кнопку **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**  и в появившемся диалоговом окне назначить параметры триангуляции. После выхода из окна по кнопке **ОК** будет выполнена триангуляция.

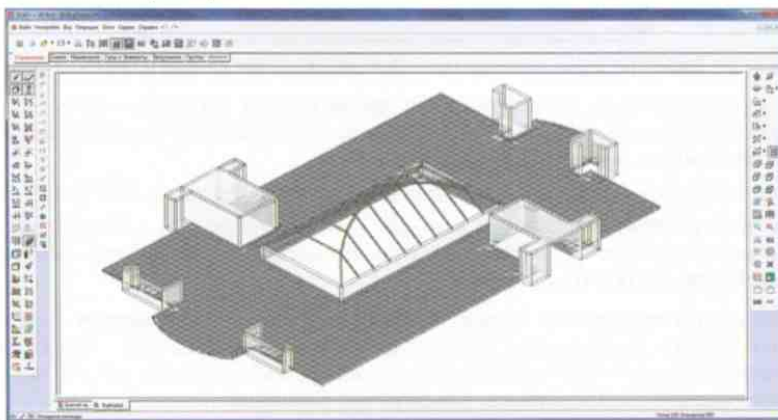


Рис. 5.12-4. Схема, полученная в результате триангуляции укрупненного элемента

Перед выходом из режима триангуляции полученная в результате схема (рис. 5.12-4) должна быть установлена на «место» или записана в виде отдельной схемы.

### Параметры триангуляции

Перед выполнением триангуляции в окне **Автоматическая триангуляция** (см. рис. 5.12-5) выбирается метод триангуляции, назначаются параметры и задаются (если это необходимо) жесткостные характеристики конечных элементов (для этого используется кнопка **Жесткости**).

В соответствии с выбранным методом триангуляция может быть выполнена:

- **А — Только на заданных узлах** — новые узлы не формируются, триангуляция выполняется таким образом, что в ней участвуют только существующие узлы на контуре и в области триангуляции;
- **Б — Без разбиения участков контура** — область триангуляции разбивается на конечные элементы с заданным максимальным размером ребер (шаг триангуляции), но без ввода дополнительных узлов на участках контура;

- **В — С разбивкой контура** — область триангуляции и контур разбиваются в соответствии с заданным шагом;
- **Г — Только на узлах контура** — сетка конечных элементов строится только на узлах контура, узлы в области триангуляции в формировании сетки не используются (даже если они попали в область).

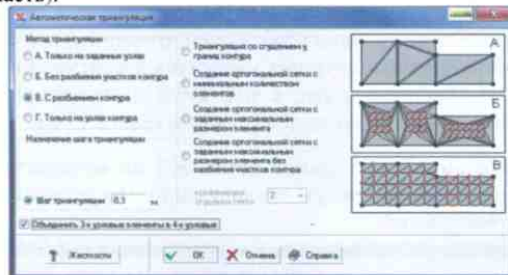


Рис. 5.12-5. Диалоговое окно Автоматическая триангуляция

Если в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** установлен признак объединения трехузловых элементов в четырехузловые, то в процессе формирования схемы такое объединение будет выполнено для всех допустимых пар треугольников.

Дополнительно могут быть заданы особенности формирования сетки, а именно:

**Триангуляция со сгущением у границ контура** — используется метод **В**, но у границ контура формируется сетка элементов, шаг которой меньше заданного в число раз, указанное в поле **Коэффициент сгущения сетки** (значение от 2 до 4);

**Формирование ортогональной сетки с минимальным количеством элементов** — ортогональная область триангуляции разбивается на конечные элементы с преимущественным использованием прямоугольных треугольников или квадратных и прямоугольных элементов (если активна опция **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые**);


**Формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента** — формируется сетка с преимущественным использованием прямоугольных треугольников или квадратных и прямоугольных элементов (если активна опция **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые**), стороны которых меньше или равны значению шага;

**Формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента без разбиения участков контура** — формируется сетка с преимущественным использованием прямоугольных треугольников или квадратных и прямоугольных элементов (если активна опция **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые**), стороны которых меньше или равны значению шага. При построении сетки не добавляются новые узлы на контуре.



При формировании ортогональной сетки может возникнуть ситуация, при которой возникнут слишком "вытянутые" прямоугольники. В этом случае программа сама переключится на алгоритм создания неортогональной сетки, чтобы избежать появления элементов с плохой геометрической формой. При принятии решения о смене алгоритма программа ориентируется на заданное пользователем в параметрах расчета (см. главу 11) *максимально допустимое соотношение сторон плит и оболочек*.


Для назначения жестких характеристик элементам в окне **Автоматическая триангуляция** используется кнопка **Жесткости**, нажатие которой вызывает диалоговое окно **Жесткости пластин**.

Схема, созданная в результате триангуляции, фактически является самостоятельной подсхемой, и после завершения триангуляции ее нужно «установить на место», т. е. присоединить к узлам расчетной схемы, которые учитывались при выполнении триангуляции. Для этого используется кнопка  — **Установка сформированной схемы по месту**.

Если подсхему предполагается присоединять к другим участкам расчетной схемы или другим схемам, ее следует сохранить как отдельный проект под уникальным именем (отличным от имени основной схемы), воспользовавшись кнопкой  — **Запись результатов триангуляции**.

Если в результате триангуляции создана новая схема, то ее присоединение к основной схеме выполняется в режиме **Сборка** (см. раздел 5.13).

При триангуляции области, принадлежащей существующей расчетной схеме, контур задается непосредственно на схеме или ее фрагменте.



До тех пор, пока схема не установлена по месту, от результатов триангуляции можно отказаться, выполнив операцию **Отказ от результатов триангуляции** — . Этой же операцией следует воспользоваться в случае, когда после установки схемы по месту необходимо продолжить работу в режиме триангуляции.

#### **Некоторые «тонкости»**

- Если в область триангуляции попали стержневые элементы, включая контурные, то они разбиваются на ряд элементов по длине в соответствии с заданным шагом триангуляции.
- Все узлы, попавшие в область триангуляции и не принадлежащие области внутренних контуров, будут учтены при формировании сетки.
- Триангуляция не выполняется, если в области триангуляции есть совпадающие узлы;
- Если после выполнения триангуляции необходимо повторить разбиение установленной области, например, с другим шагом или способом триангуляции, то для этого достаточно, не сбрасывая ранее полученную разбивку, вызвать повторно операцию **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости** —  и задать новые параметры триангуляции.
- Если по какой-либо причине необходимо повторить ввод ранее введенного контура, то перед этим надо обязательно выполнить операцию **Отказ от результатов триангуляции** — , в противном случае будет выдано сообщение об ошибке.

#### **Сгущение сетки**



Для сгущения сетки в окрестностях существующих узлов следует выполнить следующие действия:

- задать или выбрать из списка контур триангуляции;
- нажать кнопку  — **Узлы сгущения сетки**;
- выбрать узлы, в окрестностях которых сгущается сетка (выбранные узлы будут выделены цветом);
- нажать кнопку  — **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**;

## 5. Создание расчетной схемы

- в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** выбрать режим триангуляции и назначить коэффициент сгущения сетки (от двух до четырех);
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне.

Сгущение сетки вдоль линии выполняется в следующем порядке:

- задать или выбрать из списка контур триангуляции;
- нажать кнопку  — **Указание линии сгущения сетки**;
- выполнить ввод линий по правилам, аналогичным вводу стержней (введенные линии будут выделены цветом контура);
- нажать кнопку  — **Генерация треугольной сетки КЭ на плоскости**;
- в диалоговом окне **Автоматическая триангуляция** выбрать режим триангуляции и назначить коэффициент сгущения сетки (от двух до четырех);
- нажать кнопку **ОК** в диалоговом окне.

Допускается одновременно выполнять сгущение сетки в окрестностях узлов и вдоль линий.

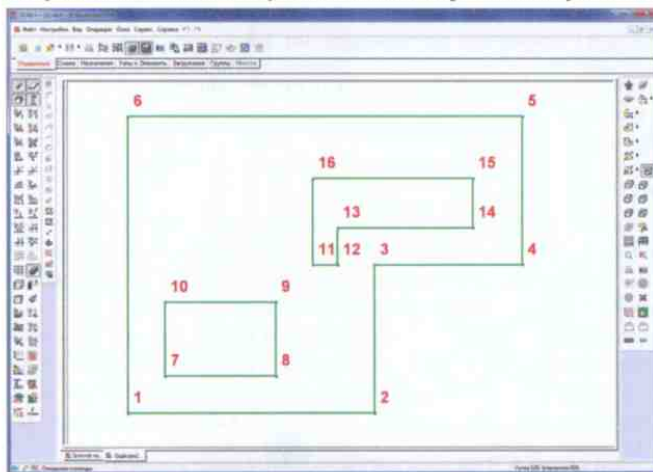


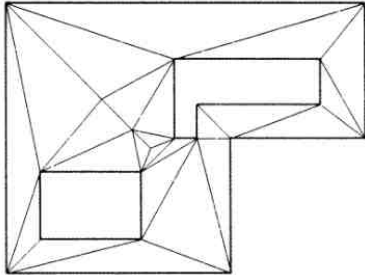
Рис. 5.12-6. Узлы в области триангуляции и заданные на их основе контуры

В качестве примера рассмотрим триангуляцию области, лежащей в плоскости XOY, с узлами, координаты которых приведены в следующей таблице:

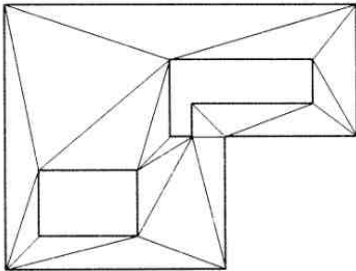
Узлы внешнего контура			Узлы внутренних контуров		
№ узла	X	Y	№ узла	X	Y
1	0.0	0.0	7	3.0	3.0
2	20.0	0.0	8	12.0	3.0
3	20.0	12.0	9	12.0	9.0
4	32.0	12.0	10	3.0	9.0
5	32.0	24.0	11	15.0	12.0
6	0.0	24.0	12	17.0	12.0
			13	17.0	15.0
			14	28.0	15.0
			15	28.0	19.0
			16	15.0	19.0

Номера введенных узлов и контуры, заданные на их основе, показаны на рис. 5.12-6. В области триангуляции в зависимости от выбранного метода могут быть сформированы различные сетки, показанные на рисунках ниже.

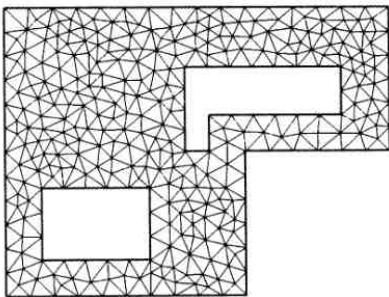
В зависимости от выбранного метода триангуляции в приведенной на рисунке 5.12-6 области будут получены следующие сетки конечных элементов:



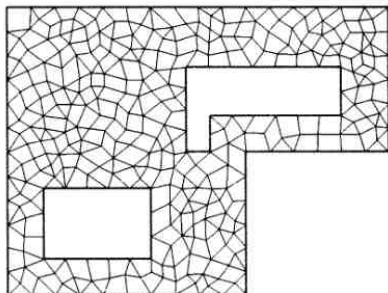
- без разбиения участков контура;



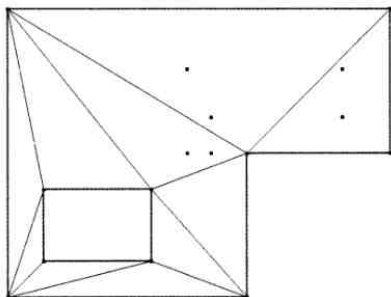
- только на заданных узлах;



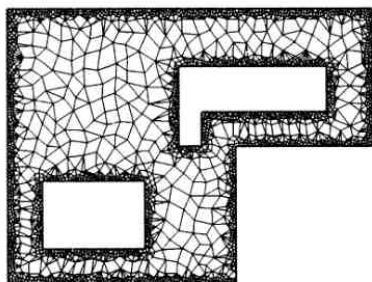
- с разбивкой контура (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** выключен);



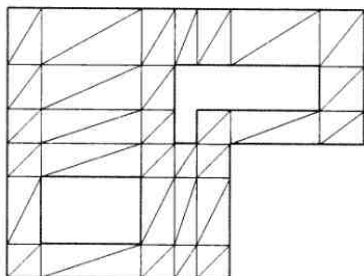
- с разбивкой контура (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** включен);



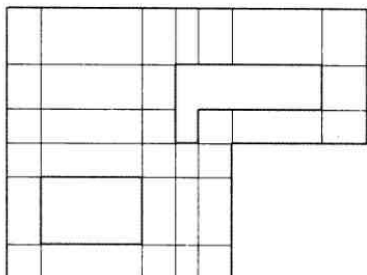
- только на узлах контура;



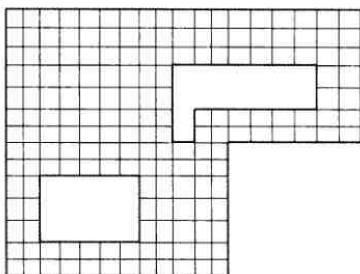
- триангуляция со сгущением у границ контура;



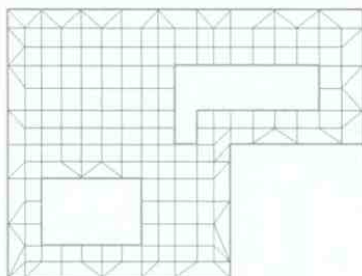
- формирование ортогональной сетки с минимальным количеством элементов (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** выключен);



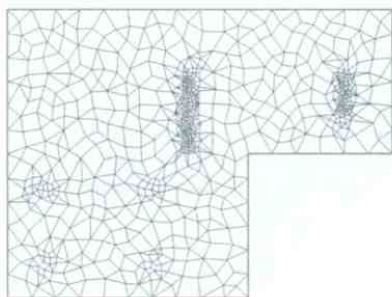
- формирование ортогональной сетки с минимальным количеством элементов (маркер **Объединить 3-х узловые элементы в 4-х узловые** включен);



- формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента;



- формирование ортогональной сетки с заданным максимальным размером элемента без разбиения участков контура;



- сгущение сетки в окрестности выбранных узлов и вдоль заданных линий.

### Оценка качества триангуляции



Для оценки качества полученной сетки конечных элементов используется одноименная операция в инструментальной панели управления триангуляцией. Для трех и четырех узловых элементов оценка выполняется по следующим параметрам:

- коэффициент формы — величина, вычисляемая по формуле  $\frac{\sum_{i=1,2,3,4} L_i^2}{4S}$ , где  $L_i$  — длина  $i$ -й стороны,  $S$  — площадь элемента;
- минимальный угол в элементе — в качестве критерия качества используется минимальный угол элемента;
- максимальный угол в элементе — в качестве критерия качества используется максимальный угол элемента;
- депланация (отклонение от плоскостности) для четырехузловых элементов — по четырем точкам строится плоскость, которая наилучшим образом аппроксимирует вершины элемента. Вычисляется максимум из расстояний от вершин до плоскости. Результат делится на длину минимальной стороны.



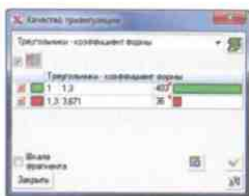



Рис. 5.12-7. Диалоговое окно **Качество триангуляции**



Рис. 5.12-8. Диалоговое окно **Настройки**

Результаты оценки качества отображаются в виде цветовой шкалы (рис. 5.12-7). Зеленым цветом на схеме отмечаются элементы, у которых значение исследуемого фактора лежит в пределах установленной нормы, а красным — выходит за эти пределы. Диапазон допустимых значений «От и До» задается в одноименных полях ввода диалогового окна **Настройки** (рис. 5.12-8), которое вызывается нажатием кнопки



**Настройки цветовой шкалы** — .

Принципы управления цветовой шкалой не отличаются от цветowych шкал визуализации других параметров расчетной модели и описаны в разделе 4.3. Вывод на схеме значений фактора выполняется нажатием кнопки **Оцифровка** — , расположенной в окне цветовой шкалы.

По умолчанию результаты оценки качества отображаются в виде «проволочной» модели. Для более наглядной визуализации можно воспользоваться операцией **Удаление линий невидимого контура** на панели фильтров .

## Повышение качества триангуляции



Если качество триангуляции (оценить его можно с помощью операции ) оказывается неудовлетворительным, то его можно попытаться повысить, нажав в инструментальной панели кнопку . При этом программа произведет попытку сместить те узлы, которые были порождены в процессе создания конечноэлементной сетки, таким образом, чтобы улучшить показатели качества.

## Экспорт контура триангуляции в программу GMSH



Эта операция используется для сохранения контура триангуляции в формате программы **GMSH** (свободно распространяемая программа триангуляции). После выполнения триангуляции этой программой полученную сетку можно импортировать в **SCAD** (см. раздел 32.1).

## 5.13. Сборка схемы из нескольких схем



### — Режим сборки

Этот режим позволяет выполнить формирование расчетной схемы путем ее сборки из нескольких заранее подготовленных схем и/или групп элементов (создание групп и работа с ними описаны в разделе 6.6). При этом схемы, используемые при сборке, могут включать кроме геометрии и другие характеристики, например, связи, жесткости, нагрузки и т. п., которые в