



ГРУППА КОМПАНИЙ «КОММУНЖИЛПРОЕКТ»

тел/факс 8 (812) 602-78-97

contact@kommproekt.ru

www.kommproekt.ru

РП VV.G 01.10-2012

Обозначение документа

РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

VISUAL VECTOR. GAS

Система моделирования наружных сетей газоснабжения

ВЕРСИЯ 7.0

Петрозаводск

2012

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
1 ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ	3
1.1 Назначение программы	3
1.2 Демонстрационная версия	3
2 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА СЕТИ	3
2.1 Расчетная схема	3
2.2 Формирование топологии (начертания) сети. Общие вопросы	4
2.3 Установка новых узлов	4
2.4 Установка новой дуги	5
2.5 Сеточная привязка и растровая подложка	6
2.6 Удаление и перемещение элементов графа сети	8
2.7 Сохранение схемы	8
3 ЗАПОЛНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПО УЗЛАМ И УЧАСТКАМ СЕТИ	9
3.1 Заполнение исходных данных по расчетной схеме. Общие вопросы	9
3.2 Ввод информации об участках сети	9
3.3 Ввод информации по узлам сети	11
3.4 Работа со справочниками программы	13
3.5 Дополнительные функции, используемые при построении расчетной схемы	14
4 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ	15
5 ПРОВЕДЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В ПРОГРАММЕ	17
5.1 Поверочный расчет сети	18
5.2 Оптимальный синтез сети	25
5.3 Контрольные примеры расчета наружных газопроводных сетей	26

1 ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

1.1 Назначение программы

Система моделирования наружных сетей газоснабжения «Visual Vector. Gas» реализует положения СП 42-101-2003 в отношении гидравлического расчета газопроводных сетей высокого, среднего и низкого давления; при этом на конфигурацию самой сети не накладываются никакие специальные ограничения: сеть может быть произвольным образом закольцована, количество узлов отбора газа и узлов его подачи в сеть не ограничено.

Программа позволяет производить внутреннюю гидравлическую увязку газопроводных сетей низкого, среднего и высокого давления, позволяет решать некоторые оптимизационные задачи, имеет встроенные средства визуализации и анализа результатов гидравлических расчетов.

Поскольку программа постоянно развивается, дополняется новыми возможностями и функциями, то внешний вид отдельных функциональных элементов программы может отличаться от представленных в описании. Информация о новых функциях и изменениях приводится на официальном сайте программы.

1.2 Демонстрационная версия

Демонстрационная версия программы предназначена исключительно для ознакомления с «идеологией» моделирования, внешним видом программы, а также с проведением ограниченных численных экспериментов с несколькими примерами, поставляемыми с программой. Из демонстрационной версии удалена вся функциональная часть, отвечающая за построения пользовательских расчетных схем, отсутствуют некоторые расчетные функции. Перечень демонстрационных примеров, поставляемых с программой, приведен ниже:

- 1) Контрольный пример 1. Простейшая мостиковая схема. Сеть низкого давления
- 2) Контрольный пример 2. Простейшая двухконтурная сеть. Сеть низкого давления
- 3) Контрольный пример 2. Простейшая двухконтурная сеть. Сеть низкого давления
- 4) Контрольный пример 4. Восьмиконтурная сеть высокого давления

2 ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА СЕТИ

2.1 Расчетная схема

Расчетная схема – совокупность информации о топологии (начертании) сети, длинах, диаметрах, материалах труб отдельных участков, отборах потребителей и подачах источников, а также высотном положении узлов сети. В зависимости от типа решаемой задачи набор исходных данных при построении расчетной схемы может различаться, но в целом процедура создания расчетной схемы остается постоянной и включает в себя несколько этапов, основными из которых являются:

- этап формирования топологии (начертания) сети в графическом редакторе программы,
- этап заполнения исходных данных по узлам и участкам сети.

В данном разделе приводится описание процедуры формирования топологии сети.

2.2 Формирование топологии (начертания) сети. Общие вопросы

Структура сети моделируется конечно ориентированным связным графом. Граф состоит из отдельных узлов и соединяющих их между собой дуг (участков). Для формирования графа, описывающего топологическую структуру сети, в программе используется собственный графический редактор. Графический редактор доступен сразу же после запуска программы (см. рисунок 2.1).

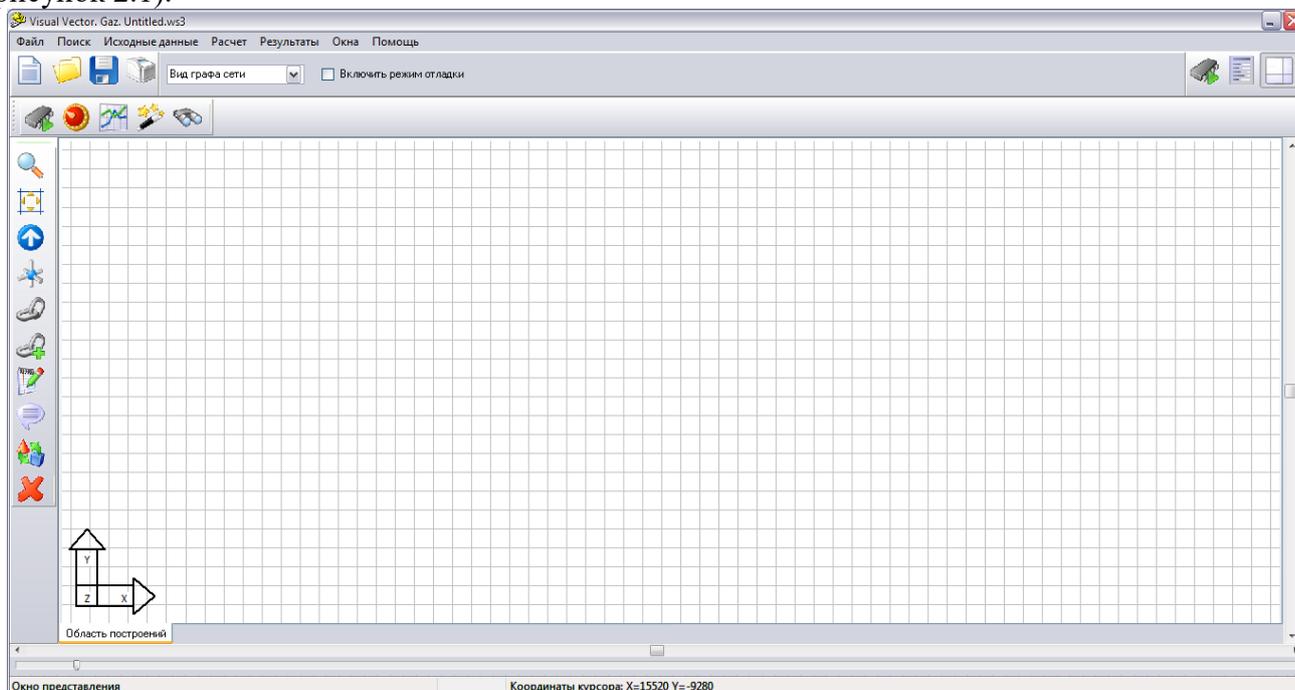


Рисунок 2.1 Главное окно программы

Схема сети строится в окне представления графа сети без соблюдения масштаба с использованием команд графического редактора. Основные функции графического редактора доступны из инструментальной панели «Рисование», которая по умолчанию расположена в левой части главного окна программы. Для построения графа сети необходимо установить узлы сети и соединить их дугами (участками). Участок сети определяется как гидравлически однородный элемент, в том смысле, что он обладает фиксированной длиной, внутренним диаметром, шероховатостью внутренней поверхности (либо потери энергии потока при движении по нему подчиняются одной зависимости) при этом совершенно необязательно, что расчетный (в модели) участок совпадает с реальным участком на сети. Один расчетный участок в модели может описывать сразу несколько последовательно или параллельно соединенных натуральных участков. Принципы подобного эквивалентирования определяются самим пользователем. Участок сети в модели ограничен двумя узлами (начальным и конечным). Установка нового узла обычно является следствием следующих причин: изменяется диаметр трубопроводов или материал труб, к сети подключается потребитель.

2.3 Установка новых узлов

Установить узел на сети можно двумя способами.

Способ первый. Использовать команду «Установить новый узел», которой

соответствует в инструментальной панели «Рисование» пиктограмма . После перехода в режим установки узла необходимо выбрать соответствующее ему место в окне представления графа сети и щелкнуть левой кнопкой мышки. Для перемещения по пространству модели в окне представления графа сети могут быть использованы полосы прокрутки, команды «Показать все» и «Просмотр представления графа сети» инструментальной панели, а также масштабный бегунок. Увеличить масштаб отображения графа сети можно также с помощью команды «Включить режим масштабирования представления графа», которой соответствует пиктограмма . После перехода в этот режим при каждом щелчке левой кнопки мышки в окне представления графа сети масштаб отображения будет увеличиваться.

Способ второй. Использовать команду «Провести полидугу», которой соответствует в инструментальной панели «Рисование» пиктограмма . Команда полидуга позволяет построить совокупность узлов, уже соединенных между собой участками (дугами). После перехода в режим «Провести полидугу» программа ждет от пользователя указания по установке первого узла полидуги. Это может быть уже существующий узел: в этом случае пользователь указывает его курсором мышки и щелкает левой кнопкой мышки. Если узел новый, то необходимо выбрать соответствующее ему место в окне представления графа сети и щелкнуть левой кнопкой мышки. После установки первого узла программа ожидает от пользователя выбора следующего узла, местоположение которого также определяется левым щелчком мышки по месту предполагаемой установки узла. Он также может быть уже существующий: в этом случае после выбора его курсором с последующим щелчком левой кнопкой мышки программа соединит дугой первый и второй узел. В случае, когда второй узел новый, программа соединит дугой первый и второй узел и будет ждать от пользователя выбора следующих узлов. Процесс построения полидуги прерывается в том случае, если пользователь укажет в качестве узла полидуги существующий узел, либо при выборе пункта «Завершить построение» всплывающего (контекстного меню). Контекстное меню можно вызвать в любой момент с помощью щелчка правой кнопки мышки по окну представления графа сети (см. рисунок 2.2).

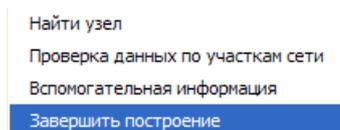


Рисунок 2.2 Контекстное меню графического редактора

2.4 Установка новой дуги

Соединить два узла между собой можно либо с помощью команды «Провести полидугу» описанной ранее, либо с использованием команды «Установить новые дуги», которой соответствует в инструментальной панели «Рисование» пиктограмма . После перехода в режим «Установить новые дуги» программа ждет от пользователя указания по выбору начального узла дуги. Это должен быть обязательно уже установленный ранее узел. После щелчка левой кнопкой мышки по существующему узлу программа перейдет в режим ожидания выбора пользователем конечного узла сети. Выбор этого узла делается аналогичным образом – с помощью щелчка левой кнопки мышки

2.5 Сеточная привязка и растровая подложка

Для облегчения задачи построения графа сети могут быть использованы следующие вспомогательные инструменты.

Сеточная привязка. При включенном режиме сеточной привязки любые графические построения производятся с учетом расположения узлов калибровочной сетки. В этом случае, например, установить узлы графа сети возможно только в узлах калибровочной сетки. Режим сеточной привязки включен по умолчанию при запуске программы. Отключить / Включить его можно с помощью главного меню программы «Исходные данные» → «Сетка», либо нажатием кнопки F7, либо с помощью пиктограммы , размещенной в правом верхнем углу главного окна программы. Шаг сетки можно указать (при построении схем с соблюдением масштаба) в окне «Свойства модели сети» (см. ниже, также на рисунке 2.4.).

Растровая подложка. Значительно ускорить процесс построения расчетной схемы можно с использованием графических материалов и вспомогательных схем. При наличии оцифрованных материалов в формате Microsoft Bitmap их можно использовать в качестве подложки для подготовки расчетной схемы (см. рисунок 2.3).

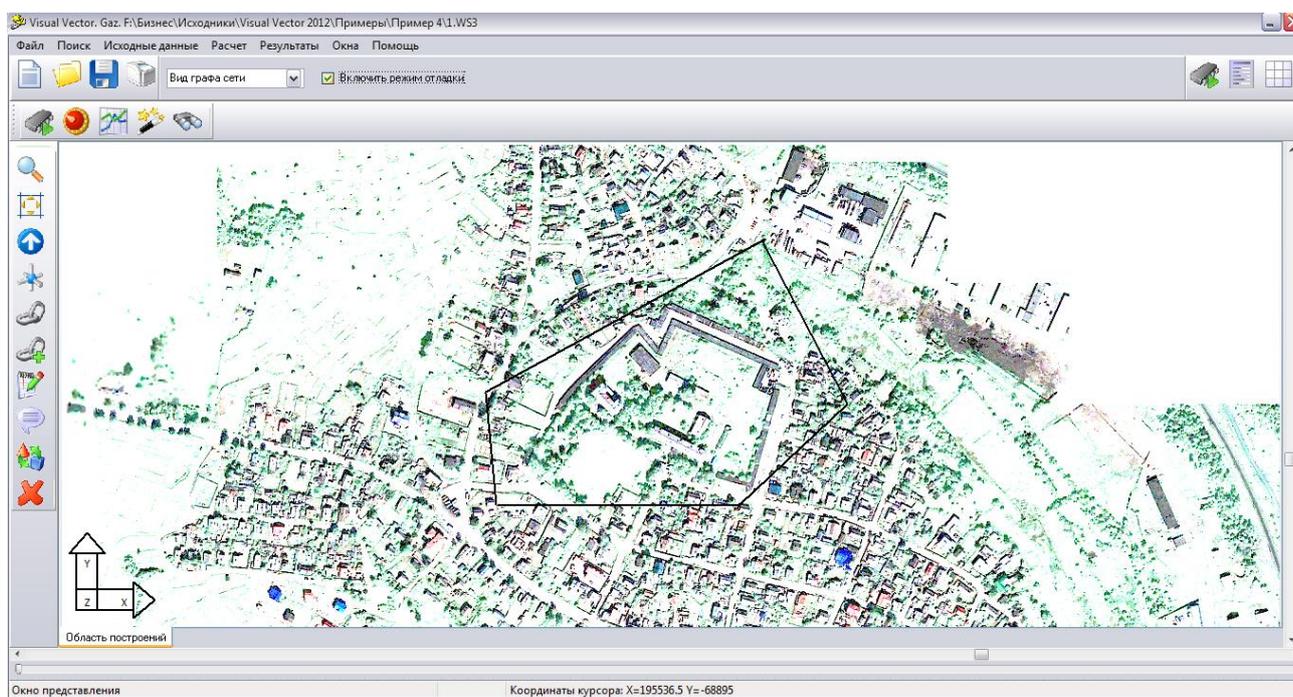


Рисунок 2.3. Использование растровой подложки для построения модели сети

Информация о подложке для текущей схемы хранится вместе со схемой (в одном каталоге!), т.е. один раз загруженная в схему растровая подложка будет открываться и в последующие сеансы работы с данной схемой. Для загрузки растра в схему используется окно «Свойства модели сети», которое можно открыть, воспользовавшись соответствующей пиктограммой  в правом верхнем углу главного окна программы или командой главного меню «Исходные данные» → «Свойства модели сети».

Общий вид окна «Свойства модели сети» представлен на рисунке 2.4.

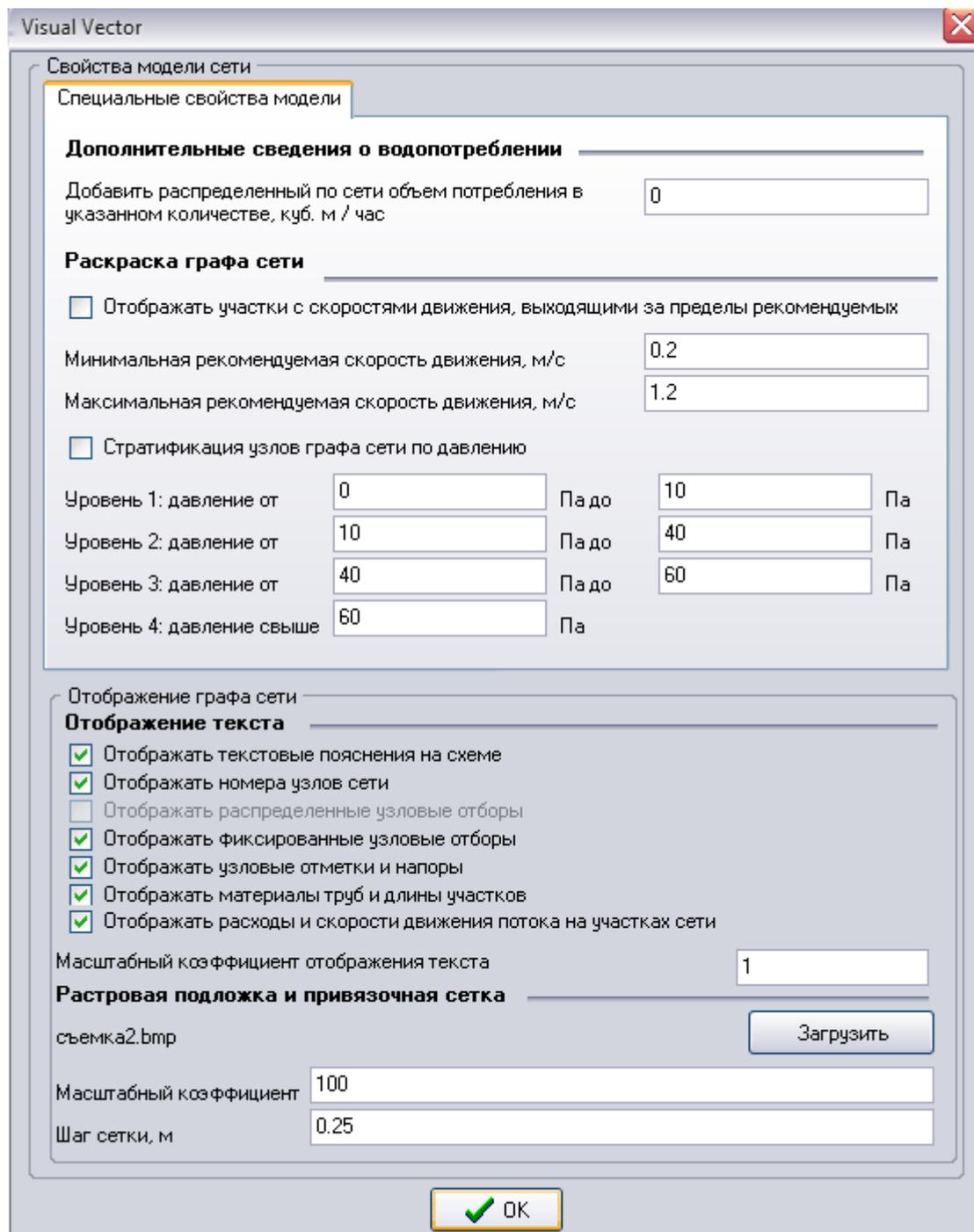


Рисунок 2.4. Окно «Свойства модели сети»

Не останавливаясь здесь подробно на настройках, связанных с визуализацией расчетной схемы и результатов расчетной схемы, отметим, каким образом осуществляется связь текущей расчетной схемы с растром. Для загрузки растра используется кнопка «Загрузить», после нажатия на которую, открывается стандартное диалоговое окно Windows, а программа ждет от пользователя выбора графического файла. Программой поддерживаются основные типы растровых изображений в формате .bmp, .jpg. При включенной растровой подложке ее можно

отключить двумя способами.

Способ первый. При нажатии кнопки «Загрузить» и выборе несуществующего графического файла программа отключит связь графической схемы с растром;

Способ второй. С использованием переключателя «Растровая подложка», доступного из главного меню «Исходные данные» → «Растровая подложка». С отключенным переключателем «Растровая подложка» связь графической схемы с растром будет сохранена, но отображения растра будет выключено.

2.6 Удаление и перемещение элементов графа сети

Для удаления элементов графа сети используется команда «Удалить объекты графа и его представления», которой соответствует пиктограмма  инструментальной панели «Рисование». После перехода в режим удаления следует выбрать элемент гидравлической цепи и щелкнуть левой кнопкой мышки, после чего данный элемент будет из цепи удален. Обратите внимание на порядок удаления из схемы элементов: любой узел цепи не может быть удален до тех пор, пока существует, по крайней мере, одна дуга, входящая или исходящая из данного узла.

При необходимости узлы графа сети можно перемещать вместе со связанными с ними дугами. Это операция осуществляется с помощью команды «Переместить объекты графа и его представления». Команде соответствует пиктограмма  инструментальной панели «Рисование». После перехода в данный режим программа ожидает от пользователя выбора узла графа сети или объектов его представления (поясняющих надписей, маркеров и пр.), для которых будет производиться операция перемещения. Выбор узла или объекта осуществляется с помощью щелчка левой кнопки мышки. На следующем этапе следует выбрать новое месторасположения объекта и зафиксировать его также щелчком левой кнопки мышки. В том случае, если в качестве объекта для перемещения выбран узел, то автоматически вместе с ним перемещаются связанные с ним дуги.

2.7 Сохранение схемы

На любом этапе построения схемы ее можно сохранить с помощью команды главного меню «Файл» → «Сохранить схему» или «Файл» → «Сохранить схему как». Во втором случае в любом случае откроется стандартное диалоговое окно «Windows» с предложением выбрать папку и название для созданного проекта (см. рисунок 2.5).

После нажатия кнопки «Сохранить» будет создан файл с описанием расчетной схемы и сопутствующие базы данных. Таким образом, каждой модели сети соответствует один файл с описанием и несколько (в зависимости от конфигурации программы) файлов баз данных. Для удобства работы рекомендуется для каждой модели сети создавать свой отдельный каталог; в нем же должна храниться (если есть) растровая подложка к схеме.

При использовании команды «Файл» → «Сохранить схему» программа сохраняет изменения в текущей схеме. В том случае, если пользователь работает со схемой ранее сохраненной на диске, то происходит ее обновление. Если схема еще не сохранялась на диск, то при выборе данной команды откроется стандартное диалоговое окно «Windows» с предложением выбрать папку и название для созданного проекта.

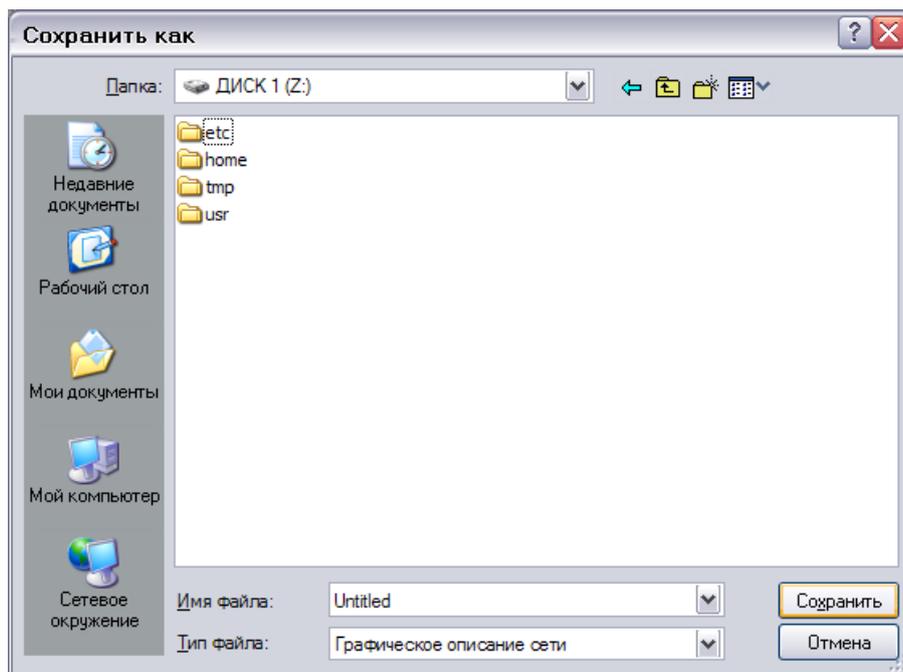


Рисунок 2.5. Выбор названия схемы для ее сохранения на диск

3 ЗАПОЛНЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПО УЗЛАМ И УЧАСТКАМ СЕТИ

3.1 Заполнение исходных данных по расчетной схеме. Общие вопросы

После того как расчетная схема построена необходимо описать ее отдельные участки и узлы. На этом этапе вводится информация о длинах, диаметрах, гидравлических сопротивлениях участков, подачах источниках и отборов у потребителей. В зависимости от типа решаемой задачи набор исходных данных может различаться. Например, при решении задачи оптимизации сети необязательно точно указывать диаметры всех участков сети – в общем случае они могут быть любые, а требуемые определяются по результатам расчетов. При моделировании действующих сетей наоборот важно задать все параметры системы «как есть».

Более подробно вопрос о требуемых для различных расчетов наборах исходных данных обсуждается в разделе 5. Здесь же остановимся на механизме ввода данных по узлам и участкам сети.

3.2 Ввод информации об участках сети

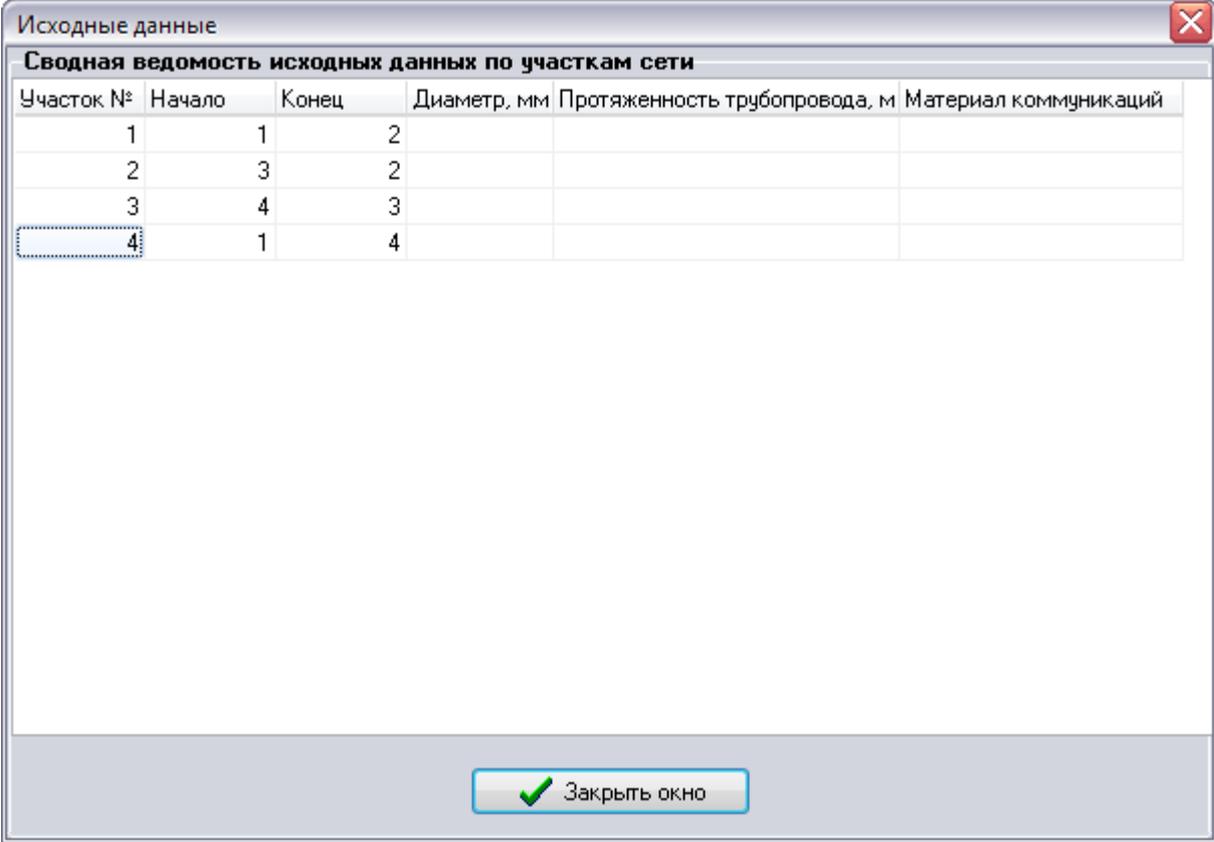
В качестве обязательной информации, вводимой по схеме для отдельного участка сети, является:

- внутренний диаметр участка сети,
- длина участка сети,
- материал труб участка сети.

Эту информацию пользователь должен задать перед проведением любых расчетов. В ряде случаев внутренний диаметр участка сети задается номинально, поскольку по результатам расчетов будет изменен (например, при решении задач оптимизации диаметров участков сети).

Для ввода данных по участкам сети могут быть использованы два способа.

Способ первый. Использование сводной таблицы исходных данных (см. рисунок 3.1). При использовании данного способа можно ввести информацию по всем участкам сети. С помощью команды «Исходные данные» → «Сводная таблица исходных данных по участкам сети» можно открыть окно «Исходные данные», содержащее «Сводную ведомость исходных данных по участкам сети». Если был построен только граф сети и никакие дополнительные данные еще не вводились, то в «Сводной ведомости исходных данных по участкам сети» будут заполнены только первые три столбца (эти данные не подлежат редактированию). Пользователь должен самостоятельно заполнить столбцы с указанием внутренних диаметров участков трубопроводов, протяженности участка и материала труб.



Участок №	Начало	Конец	Диаметр, мм	Протяженность трубопровода, м	Материал коммуникаций
1	1	2			
2	3	2			
3	4	3			
4	1	4			

Рисунок 3.1. Сводная таблица исходных данных по участкам сети

Способ второй. Использование команды «Установить свойства элементов графа» инструментальной панели «Рисование».

При использовании данного способа пользователь выбирает конкретный участок сети и устанавливает данные только для него. Для изменения (или ввода впервые) данных о конкретном участке сети необходимо воспользоваться командой «Установить свойства элементов графа» с инструментальной панели «Рисование». Этой команде соответствует пиктограмма . После перехода в режим «Установить свойства элементов графа» следует выбрать нужный участок сети и щелкнуть по нему левой кнопкой мышки. В появившемся окне необходимо заполнить (или отредактировать) информацию о длине трубопровода, внутреннем диаметре трубы и ее материала (см. рисунок 3.2).

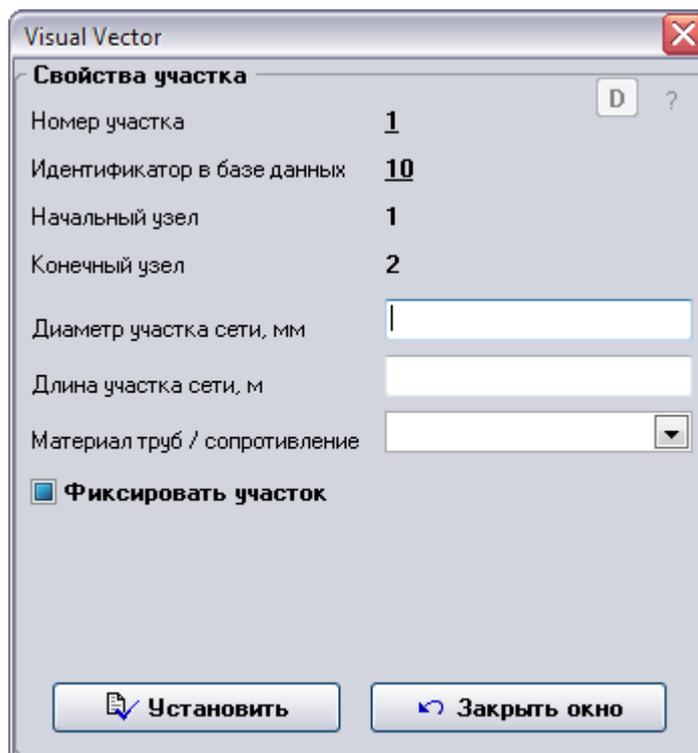


Рисунок 3.2. Свойства участка сети

При использовании данного режима доступна дополнительная функция «Зафиксировать участок» (поставить галочку у поля «Фиксировать участок» в окне «Свойства участка»). Зафиксированный участок – это особый участок сети, обладающий специальными (в зависимости от расчетной задачи) свойствами. Например, при решении задачи оптимального синтеза на зафиксированных участках сети диаметры остаются такими, какими они были заданы пользователем изначально. Более подробно о возможностях фиксации участков можно прочитать в разделе, посвященном моделированию сетей.

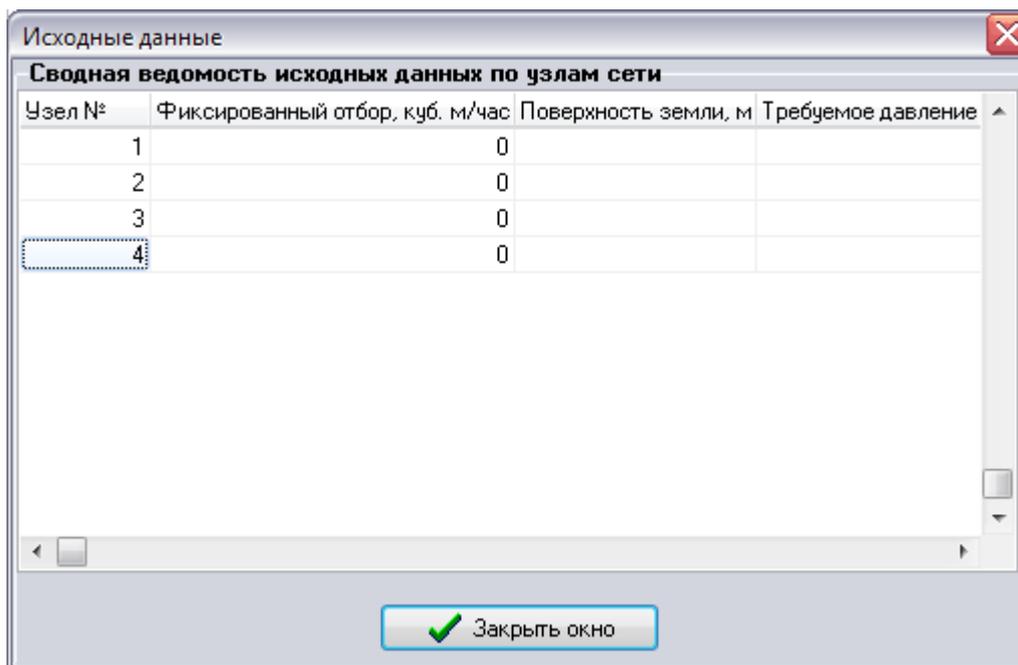
3.3 Ввод информации по узлам сети

В качестве обязательной информации, вводимой по схеме для отдельного узла сети, является:

- величина фиксированного отбора или подачи,
- отметка поверхности земли в узле (для сетей низкого давления).

Ввод информации по узлам также может осуществляться двумя способами с использованием сводной таблицы исходных данных или с помощью команды «Установить свойства элементов графа» инструментальной панели «Рисование».

Способ первый. Использование сводной таблицы исходных данных (см. рисунок 3.3). При использовании данного способа можно ввести информацию по всем участкам сети. С помощью команды «Исходные данные» → «Сводная таблица исходных данных по узлам сети» можно открыть окно «Исходные данные», содержащее «Сводную ведомость исходных данных по узлам сети».



Узел №	Фиксированный отбор, куб. м/час	Поверхность земли, м	Требуемое давление
1	0	0	
2	0	0	
3	0	0	
4	0	0	

Рисунок 3.3. Сводная таблица исходных данных по узлам сети

Если был построен только граф сети и никакие дополнительные данные еще не вводились, то в «Сводной ведомости исходных данных по узлам сети» во всех столбцах, кроме первого, где отображается номер узла сети, будут выставлены значения по умолчанию (нули). Пользователь должен самостоятельно заполнить столбцы с указанием фиксированных отборов или подач (фиксированный отбор – положительное число, фиксированная подача – отрицательное число, равное по модулю значению подачи), отметкой уровня в узле, требуемым напором в узле. В ряде случаев не обязательно или даже нецелесообразно изменять нулевые значения параметров. Более подробно этот вопрос рассматривается в разделах описания, посвященных проведению расчетов, здесь же приведем несколько частных примеров. При отсутствии отбора/подачи газа в сеть в узле поле «Фиксированный отбор» не заполняется (указывается нулевое значение). Отметка в узлах может не задаваться для сетей высокого и среднего давления.

Требуемое давление может задаваться как в узлах подачи, так и в узлах отбора. При проведении расчетов программа определит давления на узлах подачи таким образом, чтобы на во всех узлах давление было не менее заданных пользователем. Например, если известно только давление на источнике, то давления у потребителей можно не задавать – оно определится автоматически по результатам расчетов, исходя из давления на источнике. Можно наоборот не задавать давления на источнике, но указать у потребителей. В этом случае программа определит необходимое давление на источнике.

Способ второй. Использование команды «Установить свойства элементов графа» инструментальной панели «Рисование». При использовании данного способа пользователь выбирает конкретный узел сети и устанавливает данные только для него. Для изменения (или ввода впервые) данных о конкретном узле сети необходимо воспользоваться командой «Установить свойства элементов графа» с инструментальной панели «Рисование». Этой команде соответствует пиктограмма . После перехода в режим «Установить свойства элементов графа» следует выбрать нужный узел сети и щелкнуть по нему левой кнопкой

мышки. В появившемся окне (см. рисунок 3.4) необходимо заполнить (или отредактировать) информацию об узловых отборах, отметке узла, требуемом давлении.

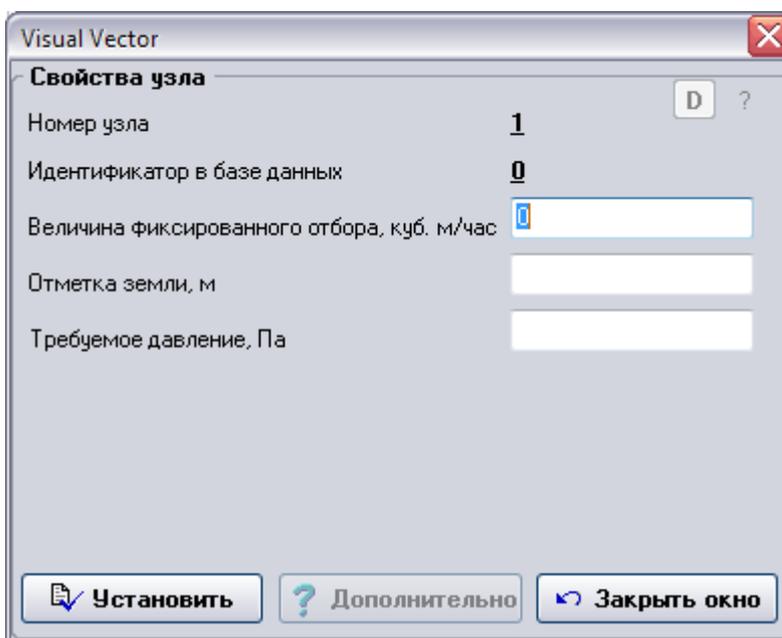


Рисунок 3.4. Свойства узла сети

Дополнительно в программу включена возможность задать расход потребителей, равномерно распределенный по длине сети. При этом такой способ задания узловых отборов может быть как единственный (узловые отборы не задаются), так и дополнительный (учитываются как узловые отборы, так и сосредоточенные). Указать распределенный по длине сети отбор можно из окна «Свойства модели сети», которое можно открыть, воспользовавшись соответствующей пиктограммой  в правом верхнем углу главного окна программы или командой главного меню «Исходные данные» → «Свойства модели сети». Распределенный по длине отбор указывается в поле «Добавить распределенный по сети объем водопотребления в указанном количестве».

3.4 Работа со справочниками программы

При заполнении данных об участках системы используются некоторый массив данных, общий для любой системы: материал участков труб системы и отвечающая материалу эквивалентная шероховатость внутренней поверхности труб. Эта информация (многократного использования) хранится в специальных базах данных – справочниках. Пользователь может корректировать информацию в справочниках и дополнять ее по своему усмотрению. Добавленные материалы труб, сопротивления становятся доступными при задании характеристик участков сети.

Для описания материалов труб и их гидравлических характеристик и особых гидравлических сопротивлений (местных сопротивлений, оросителей, фиктивных сопротивлений, имитирующих, например, водопонижение при откачке воды из скважин и пр.) доступен специальный справочник, который можно открыть с использованием команды

главного меню программы «Исходные данные» → «Справочник материалов труб и специальных сопротивлений». В окне справочника (см. рисунок 3.5) можно добавлять новые материалы трубопроводов.

Для добавления нового материала в справочник необходимо с помощью курсоров опуститься в самый низ таблицы или нажать на кнопку «Добавить». Автоматически появится новая пустая запись, которую пользователь должен заполнить.

При нажатии на кнопку «Удалить» текущая запись в справочнике будет удалена.

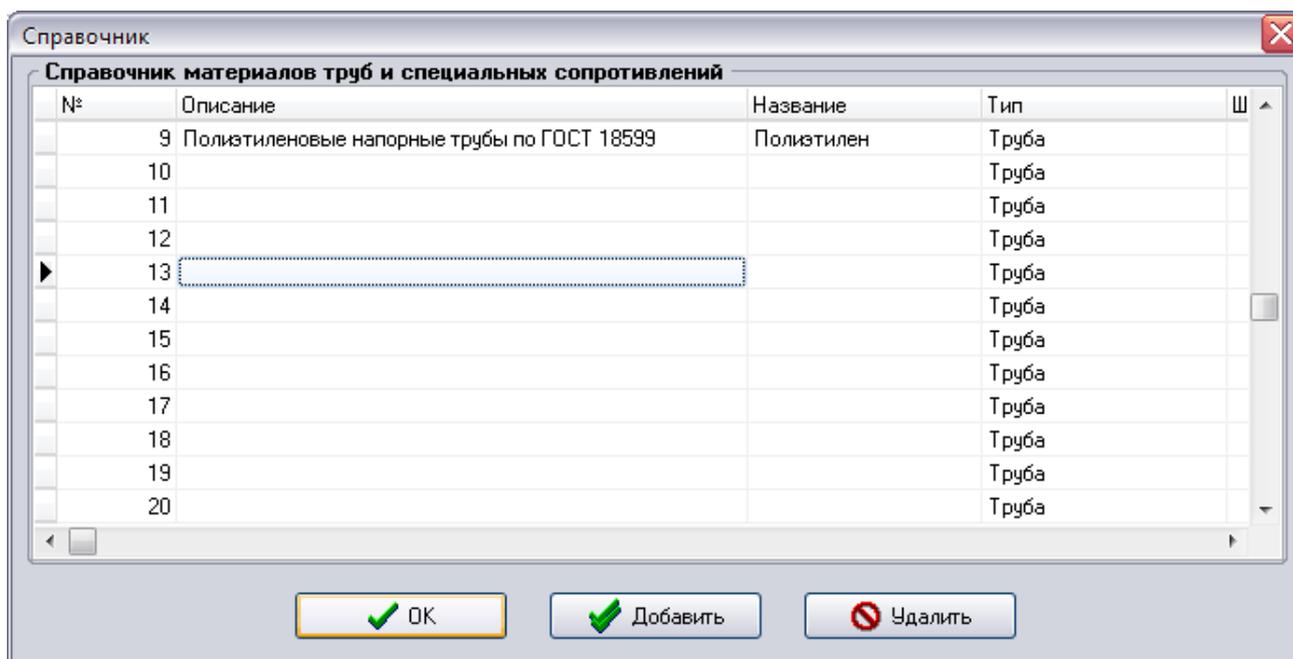


Рисунок 3.5. Справочник материалов труб

3.5 Дополнительные функции, используемые при построении расчетной схемы

Проверка полноты массива исходных данных. После того как граф сети построен, информация по узлам и участкам введена можно произвести предварительный анализ схемы на предмет наличия всей необходимой для проведения расчетов информации. В частности, можно воспользоваться командой «Проверить исходные данные», которую можно вызвать из главного меню программы: «Исходные данные» → «Проверить исходные данные». После запуска данной команды программа проверит базу данных участков и в случае, если по отдельным участкам информация введена (или введена не полностью) предложит ее заполнить. Заполнение информации производится в стиле команды «Установить свойства элементов графа» инструментальной панели «Рисование» для каждого участка, для которого введена не вся необходимая информация. Прервать процесс дополнения базы данных необходимыми сведениями можно в любой момент. Для этого в окне «Свойства участка» необходимо нажать на кнопку «Закрыть окно».

Проверка графа сети. Граф сети должен обладать некоторым набором свойств связности. В частности должно выполняться условие, в соответствии с которым, из любого узла в построенной сети, можно было бы попасть в любой другой (попасть из одного узла в другой можно, если узлы соединены между собой дугой-участком). С помощью команды «Проверить топологию схемы», которая вызывается из главного меню программы: «Исходные

данные» → «Проверить топологию схемы» можно убедиться, что необходимые условия выполняются. Кроме того, при успешном завершении проверки программы выведет на экран выявленных ею циклов (колец) в графе сети. Эта информация может представлять отдельный интерес для анализа гидравлической цепи. Можно также подсветить выделенные циклы на графе сети («Исходные данные» → «Подсветить выделенные циклы»). Прервать процесс подсветки можно в любой момент нажатием клавиши «Esc».

Поиск узла на схеме по номеру. Для поиска узла сети можно воспользоваться командой «Найти узел», которая вызывается нажатием клавиш «Ctrl+S», либо из главного меню программы «Исходные данные» → «Найти узел». В появившемся окне программы (см. рисунок 3.9) необходимо указать номер интересующего узла.

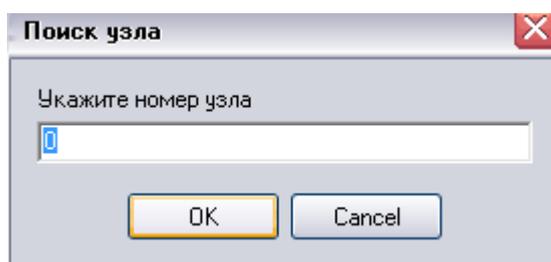


Рисунок 3.6. Поиск узлов на графе сети

Если указанный узел существует в схеме, то он отобразится в центре окна представления графа сети.

4 ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Структура газопроводной сети моделируется конечно ориентированным связным графом с e дугами и ν вершинами. Математически линейный граф отображается $\nu \times e$ матрицей инцидентности A . Элемент a_{ki} матрицы A равен $\mu 1$ в том случае, если i -я дуга инцидентна вершине k (правило знаков использует направленность дуги по отношению к инцидентной вершине) и 0 в том случае, если i -я дуга неинцидентна вершине k .

Деревом графа называется подграф, содержащий все вершины графа и не образующий ни одного замкнутого цикла. Дуги, входящие в дерево, называются ветвями дерева, остальные – хордами. Цикломатическое число, определяющее число хорд, находится по формуле $\mu = (e - \nu + 1)$. Любому произвольно выбранному дереву графа однозначно соответствует $\nu - 1$ главное сечение и фундаментальная система μ циклов.

Главное сечение представляет собой подмножество дуг графа, содержащее ветвь дерева и хорды, соединяющие два поддерева графа, которые образуются из рассматриваемого дерева после удаления этой ветви дерева; фундаментальный цикл – подмножество ребер графа, содержащее хорду и ветви графа, образующие единственную простую цепь, соединяющую концевые точки этой хорды. Для ориентированного графа $\nu - 1$ главное сечение математически записывается матрицей главных сечений Q , а система главных циклов – цикломатической матрицей B .

Элемент q_{ki} матрицы Q равен $\mu 1$ в том случае, если i -я дуга принадлежит k -му сечению (правило знаков использует направленность дуги по отношению к направлению ветви дерева), и 0 в том случае, если i -я дуга не принадлежит k -му сечению.

Элемент b_{ki} матрицы B равен $\mu 1$ в том случае, если i -я дуга входит в k -й фундаментальный цикл (правило знаков использует направленность дуги по отношению к направлению хорды цикла), и 0 в том случае, если i -я дуга не входит в k -й цикл.

Между матрицами A, Q, B существует взаимосвязь, матрица Q – может быть получена путем элементарных преобразований матрицы A , взаимосвязь между матрицами Q, B определяется основной теоремой топологии сетей: $BQ' = QB' = 0$. (4.1)

Последнее соотношение при некоторых условиях может быть представлено в более удобной для практического применения форме. Этим условием может быть, например, требование (4.2), чтобы в графе представления сети первые $\nu - 1$ дуг являлись ветвями дерева сети, остальные μ – хордами (ветвями антидерева).

Это условие может быть выполнено всегда при помощи перенумерации дуг графа. Преобразуем (4.1) при выполнении условия (4.2). Представим матрицы фундаментальных циклов и главных сечений в виде

$$Q = \begin{bmatrix} I \\ Q_2 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_1 \\ I \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

где I – единичная матрица соответствующей размерности.

После подстановки (4.3) в (4.1) имеем $\begin{bmatrix} I \\ Q_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ I \end{bmatrix}^T = 0 \Rightarrow Q_2 + B_1^T = 0$. Из последнего соотношения следует $Q_2 = -B_1^T$. (4.4)

Рассмотрение законов движения воды в кольцевой сети дает два условия, позволяющие составить некоторое число уравнений для определения искомых неизвестных стационарной модели, описывающей мгновенное распределение потоков в сети:

1. Сумма линейных расходов, приходящих к любому узлу, равна сумме линейных расходов, уходящих от этого узла, плюс узловой расход;

2. В каждом замкнутом контуре сети (кольце) сумма потерь напора на участках h , где движение воды совершается по часовой стрелке (по отношению к данному контуру), равна сумме потерь напора на участках, на которых вода движется против часовой стрелки.

В матричной форме эти законы (законы Кирхгофа) могут быть сформулированы следующим образом

$$\begin{cases} Q \times \overset{\rho}{q} = 0 \\ B \times \overset{\rho}{h} = 0 \end{cases}. \quad (4.5)$$

Законы Кирхгофа при выполнении требования (4.2) из стандартной формы (4.5) могут быть преобразованы во вспомогательную (4.6):

$$\left. \begin{cases} \overset{\rho}{q} = \begin{bmatrix} \overset{\rho}{q}_1 \\ \overset{\rho}{q}_2 \end{bmatrix} \\ \overset{\rho}{h} = \begin{bmatrix} \overset{\rho}{h}_1 \\ \overset{\rho}{h}_2 \end{bmatrix} \end{cases} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \begin{bmatrix} I \\ Q_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overset{\rho}{q}_1 \\ \overset{\rho}{q}_2 \end{bmatrix} = 0 \\ \begin{bmatrix} B_1 \\ I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overset{\rho}{h}_1 \\ \overset{\rho}{h}_2 \end{bmatrix} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overset{\rho}{q}_1 = -Q_2 \times \overset{\rho}{q}_2 \\ \overset{\rho}{h}_2 = -B_1 \times \overset{\rho}{h}_1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overset{\rho}{q}_1 = B_1^T \times \overset{\rho}{q}_2 \\ \overset{\rho}{h}_2 = -B_1 \times \overset{\rho}{h}_1 \end{cases}. \quad (4.6)$$

Форма (4.6) наиболее удобна при реализации программного обеспечения для моделирования работы напорных сетей.

Система уравнений (4.5) не является определенной, порядок системы равен $b = e = (\nu + \mu - 1)$, число же неизвестных – $2 \times e$. Недостающие замыкающие соотношения можно получить из гидравлических соображений в виде характеристики гидравлических сопротивлений или насосного оборудования $\overset{\omega}{h} = f(\overset{p}{q})$. В результате имеем систему уравнений порядка $a = 2 \times e = 2 \times (\nu + \mu - 1)$ и числом неизвестных, равных $2 \times e$.

Для определения гидравлических потерь по длине трубопроводов используется соотношение Кольбука:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} = -2 \lg \left(\frac{K_{\Delta}}{3.7d} + \frac{2.51}{\text{Re} \times \sqrt{\lambda_1}} \right), \quad (4.7)$$

где K_{Δ} , $\Delta = \frac{K_{\Delta}}{d}$ - абсолютная и относительная шероховатость трубы соответственно; d -

диаметр трубы; λ - коэффициент гидравлического трения; $\text{Re} = \frac{\nu \times d}{\zeta}$ - критерий Рейнольдса

для соответствующего режима движения жидкости в трубе; ζ - кинематическая вязкость воды

для данных условий; $\nu = \frac{4 \times q}{\pi \times d^2}$ - скорость движения жидкости в трубе.

Для сетей высокого и низкого давления разность квадратов давлений в узлах сети, принадлежащих одному участку определяется по формуле

$$p_n^2 - p_k^2 = \frac{P_0}{81 \times \pi^2} \times \lambda \times \frac{Q_0^2}{d^5} \times \rho_0 \times l, \quad (4.8)$$

где p_n - абсолютное давление в начале газопровода, МПа, p_k - абсолютное давление в конце газопровода, МПа, p_0 - нормальное давление, l - расчетная длина газопровода постоянного диаметра, м, ρ_0 - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³, Q_0 - расход газа при нормальных условиях, кг/м³.

Для сетей низкого давления падения давления на участке определяется по формуле

$$p_n - p_k = \frac{10^6}{162 \times \pi^2} \times \lambda \times \frac{Q_0^2}{d^5} \times \rho_0 \times l. \quad (4.9)$$

Для определения потокораспределения при установившемся течении газа в программе Visual Vector. Gaz используется система уравнений (4.6) с замыкающими соотношениями (4.7), (4.8), (4.9).

При этом в уравнениях потокораспределения фигурирует величина расхода газа при нормальных условиях. Для определения скоростей движения в трубопроводах при расчете сетей высокого давления программа переводит расход газа при нормальных условиях к расходам при фактических давлениях (для сетей высокого давления). Для сетей низкого и среднего давления программа дополнительно учитывает дополнительное избыточное давление обусловленное разностью геометрических отметок узлов сети.

5 ПРОВЕДЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В ПРОГРАММЕ

Для проведения расчетов и представления результатов используются команды из разделов главного меню «Расчет», «Результаты» и инструментальной панели «Моделирование» (по умолчанию размещается в левой верхней части главного окна программы). Перед

проведением любых расчетов пользователем должна быть построена расчетная схема графа сети с указанием необходимых данных об участках сети и узлах.

5.1 Поверочный расчет сети

Цель расчета: для заданных фиксированных подач источников, отборов потребителей газа и при указанных длинах участков, их диаметрах и шероховатостях внутренней поверхности материала труб определить потокораспределение в сети, а также требуемые для обеспечения указанных пользователем минимальных давлений в узлах сети давления у источников.

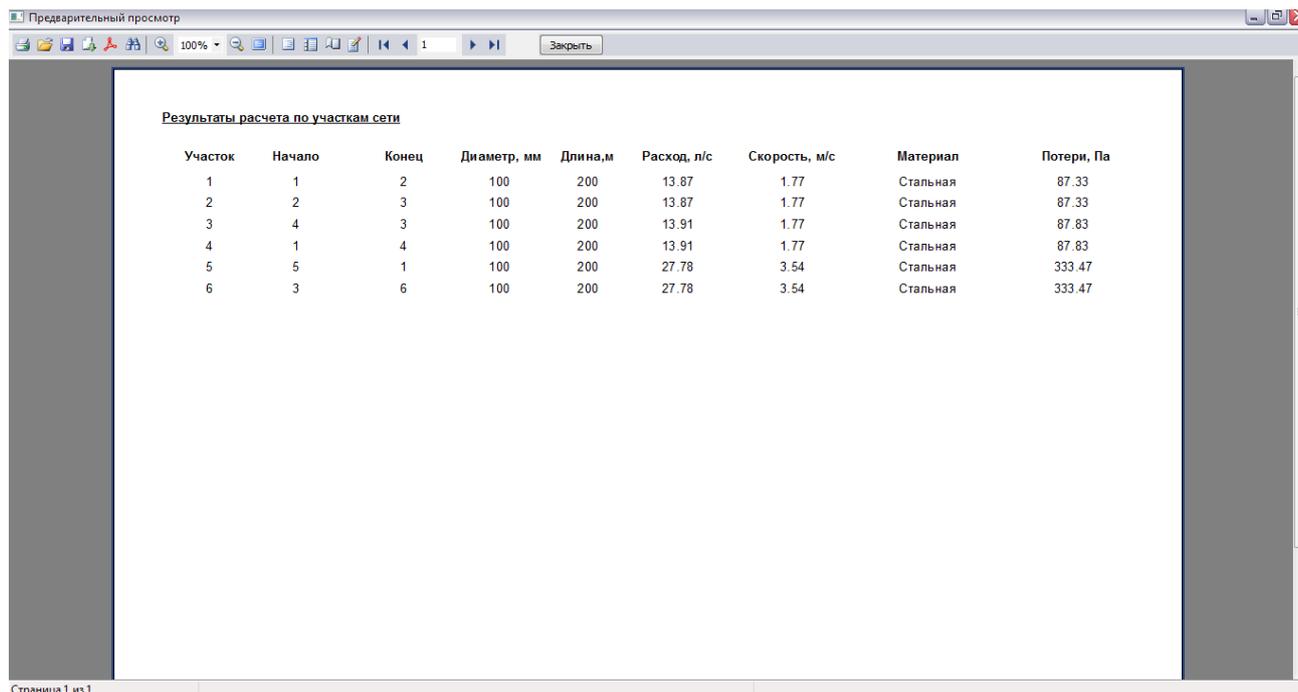
Исходные данные: структура графа сети, диаметры, длины и материалы труб участков, подачи источников, отборы потребителей газа, отметки узлов сети, требуемые давления у потребителей.

Результат расчета: потокораспределение в сети (расходы, скорости и потери давления (или разность квадратов давлений в узлах) по участкам сети); давления в узлах сети; требуемые давления на источниках, при которых во всех узлах напоры не менее заданных.

Для проведения расчета используется команда главного меню программы «Расчет» → «Гидравлический расчет» (кнопка для быстрого вызова F5), продублированная пиктограммой  на инструментальной панели «Моделирование». Если весь необходимый массив исходных данных введен, программа начнет гидравлический расчет и в случае успешного его завершения выведет на экран окно «Результаты расчета» (см. рисунок 5.1).

В данном окне указывается полученная по результатам расчетов информация о расходах, скоростях движения газа и диссипации энергии (потерях давления) на участках сети. На графе сети кроме того стрелками указываются направления движения газа, у каждого участка подписываются расходы, скорости, потери напора, а в узлах сети – напоры. В узлах подачи (узлах, в которых располагаются источники) указываются минимальные давления (отчитываемые от отметки узла), которые должны они обеспечивать для того, чтобы гарантировать во всех узлах сети давления не менее тех, которые заданы пользователем.





Участок	Начало	Конец	Диаметр, мм	Длина, м	Расход, л/с	Скорость, м/с	Материал	Потери, Па
1	1	2	100	200	13.87	1.77	Стальная	87.33
2	2	3	100	200	13.87	1.77	Стальная	87.33
3	4	3	100	200	13.91	1.77	Стальная	87.83
4	1	4	100	200	13.91	1.77	Стальная	87.83
5	5	1	100	200	27.78	3.54	Стальная	333.47
6	3	6	100	200	27.78	3.54	Стальная	333.47

Рисунок 5.2. Окно отчета по узлам сети

Для просмотра отчета используются кнопки «На следующую страницу» и «На предыдущую страницу», для печати отчета на принтере кнопка «Печать». Отчет может быть экспортирован в ряд популярных форматов (pdf, doc).

Информацию о давлении по узлам сети можно получить с использованием отчета «Результаты расчета по узлам сети», который вызывается с использованием команды главного меню программы «Результаты» → «Результаты расчета по узлам сети» (кнопка для быстрого вызова Ctrl + P). Просмотр и печать отчета осуществляется аналогичным образом.

Для построения графиков падения давления используется специальный модуль «Пьезометр». В программе «Visual Vector. Gaz» используется упрощенная версия модуля, вызываемая с помощью команды «Построить график падения давления» инструментального меню «Моделирование», которой соответствует пиктограмма . После нажатия на пиктограмму  (при использовании упрощенного модуля «Пьезометр») программа переходит в режим ожидания указания пользователем тех узлов гидравлической сети, которые войдут в график падения давления. Выбор узла осуществляется щелчком по нему правой кнопки мышки. После выбора узла он должен изменить свой цвет. Двойной щелчок по одному и тому же узлу указывает программе, что список узлов составлен. После этого на экран будет выведено окно с графиком падения давления; общий вид графика представлен на рисунке 5.3.

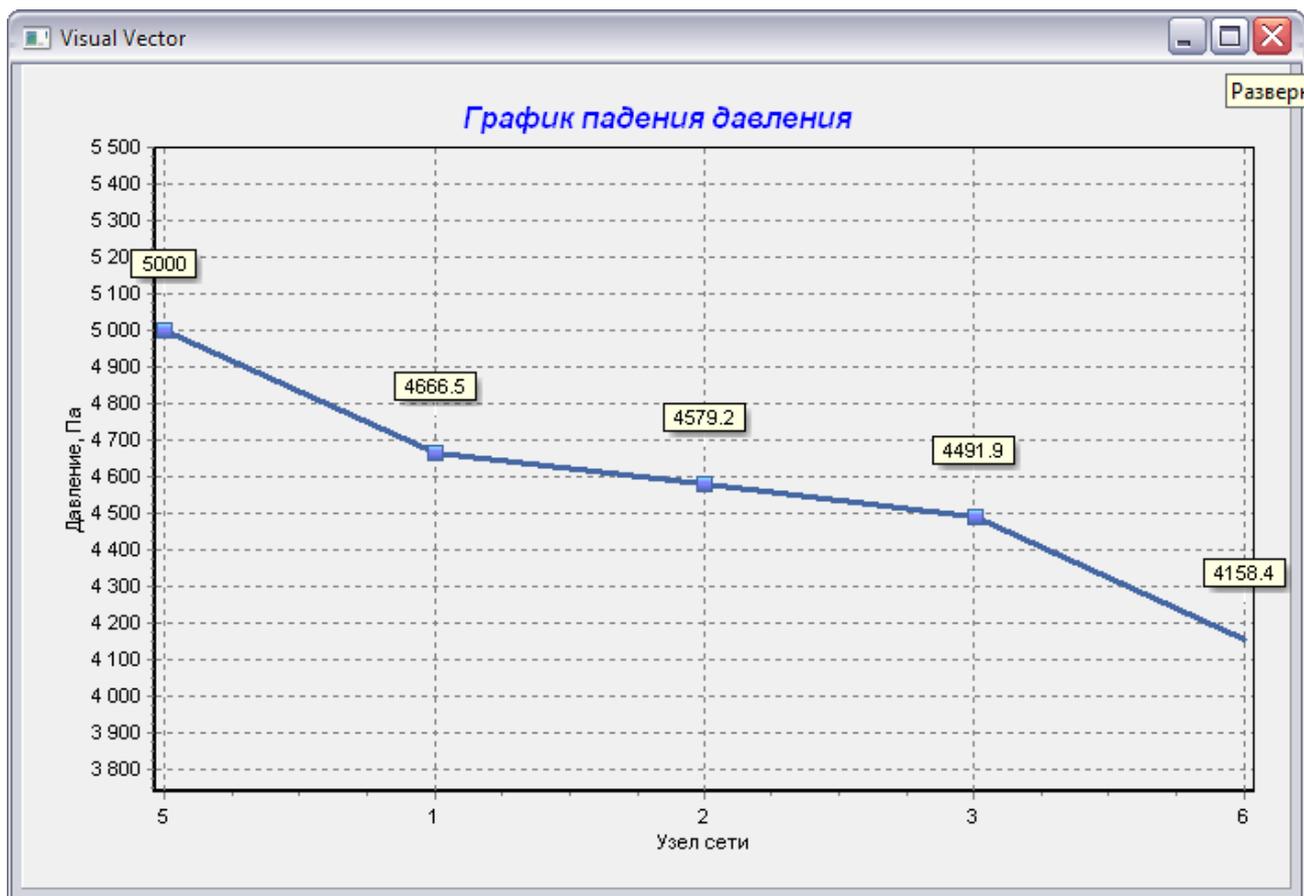


Рисунок 5.3. Результат построения графика падения давления

При анализе результатов расчетов могут быть полезны функции по раскрашиванию элементов графа сети. В простейшем случае можно воспользоваться окном настроек модели сети (см. рисунок 5.4), которое вызывается соответствующей пиктограммой  в правом верхнем углу главного окна программы или командой главного меню «Исходные данные» → «Свойства модели сети».

Visual Vector

Свойства модели сети

Специальные свойства модели

Дополнительные сведения о водопотреблении

Добавить распределенный по сети объем потребления в указанном количестве, куб. м / час

Раскраска графа сети

Отображать участки с скоростями движения, выходящими за пределы рекомендуемых

Минимальная рекомендуемая скорость движения, м/с

Максимальная рекомендуемая скорость движения, м/с

Стратификация узлов графа сети по давлению

Уровень 1: давление от Па до Па

Уровень 2: давление от Па до Па

Уровень 3: давление от Па до Па

Уровень 4: давление свыше Па

Отображение графа сети

Отображение текста

Отображать текстовые пояснения на схеме

Отображать номера узлов сети

Отображать распределенные узловые отборы

Отображать фиксированные узловые отборы

Отображать узловые отметки и напоры

Отображать материалы труб и длины участков

Отображать расходы и скорости движения потока на участках сети

Масштабный коэффициент отображения текста

Растровая подложка и привязочная сетка

Нет

Масштабный коэффициент

Шаг сетки, м

Рисунок 5.4. Окно настроек модели сети

Для отображения участков сети, скорости движения жидкости на которых выходят за пределы заданных пользователем интервалов, необходимо установить переключатель «Отображать участки со скоростями движения, выходящими за пределы рекомендуемых» в активное положение, а в полях «Минимальная рекомендуемая скорость движения» и «Максимальная рекомендуемая скорость движения» задать интервал скоростей. Например, при указанном интервале 0.2 – 1.2 все участки, скорости движения газа на которых превысят 1.2 м/с

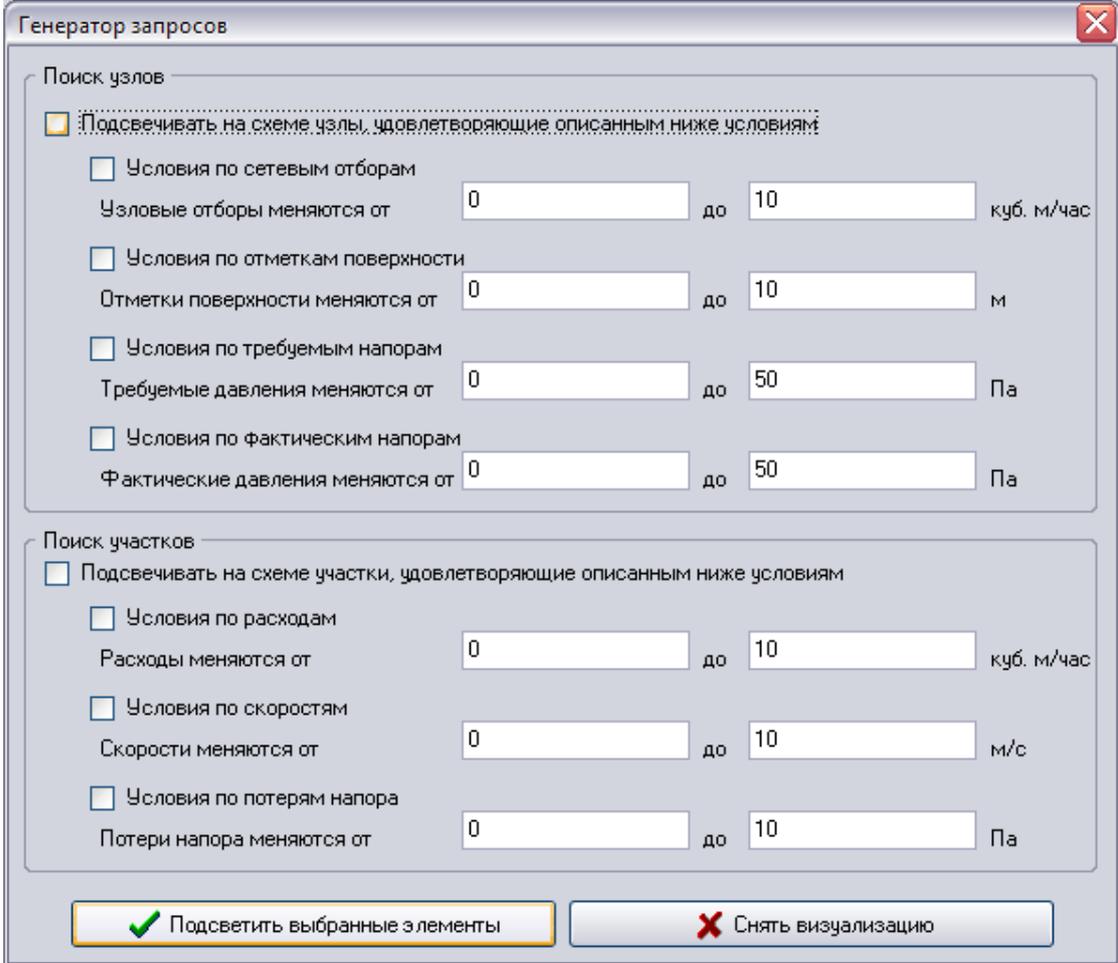
или будут составлять величины менее 0.2 м/с, отобразятся на графе сети красным цветом.

Для ранжирования узлов графа сети по давлению следует установить переключатель «Стратификация узлов графа сети по давлению» в активное положение и задать интервалы давлений в узлах.

Замечание 1. Функция раскраски сети доступна только после выполнения гидравлического расчета. Кроме того, после выполнения нового расчета раскраска графа сети автоматически отключается.

Дополнительно при работе с графом сети может быть удобна функция отключения отдельных (или всех) текстовых объектов. Для этой цели используются переключатели группы «Отображение текста».

Для подсветки узлов или участков сети, отвечающих определенным условиям, можно использовать генератор запросов, доступ к которому возможен с помощью команды «Запустить генератор отчетов» инструментальной панели «Моделирование» (пиктограмма ) , либо с использованием главного меню программы «Результаты» → «Генератор запросов». После запуска генератора запросов появится окно (см. рисунок 5.5) с предложением указать критерии выбора узлов и участков сети.



Генератор запросов

Поиск узлов

Подсветивать на схеме узлы, удовлетворяющие описанным ниже условиям

Условия по сетевым отборам
Узловые отборы меняются от до куб. м/час

Условия по отметкам поверхности
Отметки поверхности меняются от до м

Условия по требуемым напорам
Требуемые давления меняются от до Па

Условия по фактическим напорам
Фактические давления меняются от до Па

Поиск участков

Подсветивать на схеме участки, удовлетворяющие описанным ниже условиям

Условия по расходам
Расходы меняются от до куб. м/час

Условия по скоростям
Скорости меняются от до м/с

Условия по потерям напора
Потери напора меняются от до Па

Рисунок 5.5. Окно генератора отчета

Для подсветки узлов графа сети необходимо установить переключатель «Подсвечивать на схеме узлы, удовлетворяющие описанным ниже условиям» в активное положение. Напротив каждого условия, которое требуется учитывать при выборе узлов, также необходимо установить переключатель в активное положение и откорректировать (при необходимости интервал параметров). Аналогичным образом задаются критерии выбора участков графа сети.

Например, если необходимо подсветить те участки сети, на которых скорости движения газа меняются в интервале от 2 до 4 м/с, а потери давления не превышают 50 Па., необходимо установить следующие параметры запроса (см. рисунок 5.6).

The image shows a software window titled "Генератор запросов" (Generator of queries). It is divided into two main sections: "Поиск узлов" (Search nodes) and "Поиск участков" (Search sections). Each section contains a list of search criteria with checkboxes and numerical input fields.

Поиск узлов (Search nodes):

- Подсвечивать на схеме узлы, удовлетворяющие описанным ниже условиям
- Условия по сетевым отборам: Узловые отборы меняются от 0 до 10 куб. м/час
- Условия по отметкам поверхности: Отметки поверхности меняются от 0 до 10 м
- Условия по требуемым напорам: Требуемые давления меняются от 0 до 50 Па
- Условия по фактическим напорам: Фактические давления меняются от 0 до 50 Па

Поиск участков (Search sections):

- Подсвечивать на схеме участки, удовлетворяющие описанным ниже условиям
- Условия по расходам: Расходы меняются от 0 до 10 куб. м/час
- Условия по скоростям: Скорости меняются от 2 до 4 м/с
- Условия по потерям напора: Потери напора меняются от 0 до 50 Па

At the bottom of the window, there are two buttons: "Подсветить выбранные элементы" (Highlight selected elements) with a green checkmark icon, and "Снять визуализацию" (Remove visualization) with a red X icon.

Рисунок 5.6. Настройки окно генератора отчета для выделения участков

После нажатия на кнопку «Подсветить выбранные элементы» окно генератора запросов закроется, а отвечающие критериям поиска узлы и участки сети будут выделены. Для того чтобы снять выделение с узлов или участков следует нажать на кнопку «Снять визуализацию». Следует иметь в виду, что генератор запросов становится доступным только после проведения гидравлического расчета, а раскраска графа сети сохраняется до повторного расчета (принудительно удалить ее можно нажатием на кнопку «Снять визуализацию»).

5.2 Оптимальный синтез сети

Цель расчета: подобрать такие диаметры сети, при которых давления в узлах сети приближаются (сверху) к тем, которые заданы пользователем. При проведении расчета давления источников обеспечивают требуемые давления в узлах сети.

Исходные данные: структура графа сети, диаметры, длины и материалы труб участков, подачи источников, отборы потребителей, отметки в узлах сети, требуемые давления у потребителей, диапазоны скоростей движения газа.

Результаты расчета: потокораспределение в сети (расходы, скорости и потери давлений по участкам сети); давления в узлах сети; требуемые давления источников, при которых во всех узлах давления не менее заданных; при этом диаметры сети, введенные пользователем, заменяются на определенные программой.

Для решения задачи используется многопараметрический оптимизатор, позволяющий решать разнообразные задачи параметрической оптимизации. Базовая версия многопараметрического оптимизатора позволяет решать задачу конструкторского расчета сети: подбирать такие диаметры участков сети, которые приближают давления в узлах к тем, которые заданы пользователем (требуемые давления). В ходе оптимизационного процесса варьируются только диаметры тех участков сети, которые не обозначены пользователем как «зафиксированные».

Для запуска процедуры оптимизации можно использовать команду главного меню программы «Расчет» → «Многопараметрическая оптимизация», либо команду «Запустить мастер многопараметрической оптимизации» инструментальной панели «Моделирование» (пиктограмма ). Главное окно многопараметрического оптимизатора представлено на рисунке 5.7.

В верхней части экрана располагается график, отображающий ход оптимизационного процесса. В нижней части – пользователем должны быть заданы параметры, необходимые для работы т.н. генетического алгоритма, осуществляющего поиск оптимальных вариантов в пространстве возможных решений. Генетический алгоритм – поисковая процедура, используемая для решения многопараметрических задач оптимизация, сочетающая методы градиентного и случайного (ненаправленного) поиска. Большую часть указанных в разделе «Настройка генетического алгоритма» параметров изменять не рекомендуется, поскольку это может привести к значительному снижению эффективности работы генетического алгоритма. Обратить особое внимание следует на следующие поля:

«Количество экземпляров в плане» - данный параметр определяет ширину поиска в пределах одной итерации (чем параметр больше, тем эффективнее исследуется пространство возможных решений, снижается риск выхода на субоптимальное решение – локальный оптимум, но при этом растет время работы), «Число итераций» - данный параметр определяет глубину поиска, «Нижняя и Верхняя граница скоростей движения в трубопроводах» определяют границы изменения скоростей движения жидкости в трубопроводах - технические условия оптимизации.

После нажатия на кнопку «Оптимизация» начнется процесс определения диаметров сети, которые позволяют приблизиться к тем давлениям в узлах сети, которые при построении схемы были заданы пользователем.

Пользоваться процедурой оптимизации следует достаточно аккуратно, поскольку

оптимальность решения по давлениям не гарантирует обеспечение требуемой степени надежности системы и ее технической реализуемости.

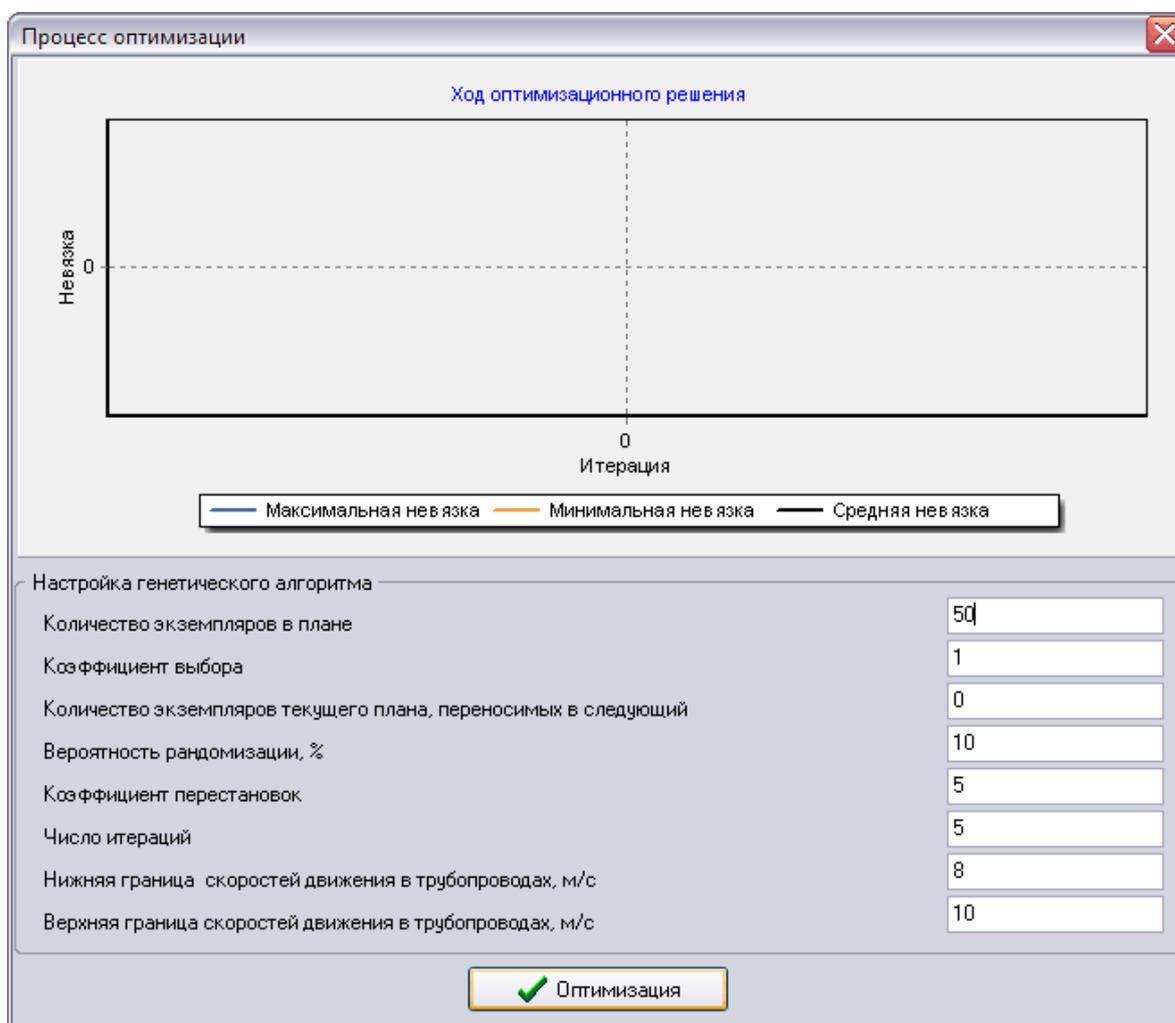


Рисунок 5.7. Настройка многопараметрического генетического оптимизатора при выполнении «конструкторского» расчета

5.3 Контрольные примеры расчета наружных газопроводных сетей

С программой поставляется несколько примеров, иллюстрирующих возможности программы с одной стороны, а с другой позволяющих проверить корректность работы программы. Рассмотрим поставляемые с программой примеры подробнее.

Контрольный пример 1. Простейшая мостиковая схема. Сеть низкого давления. Длина всех участков одинаковая и равна 100 метрам, диаметр – 100 мм. Узел подачи – 1, расчетная подача в узле 1 – 100 м³/час. Расчетный отбор в узле 6 равен подаче (100 м³/час). Давление в точке подачи – 5000 Па.

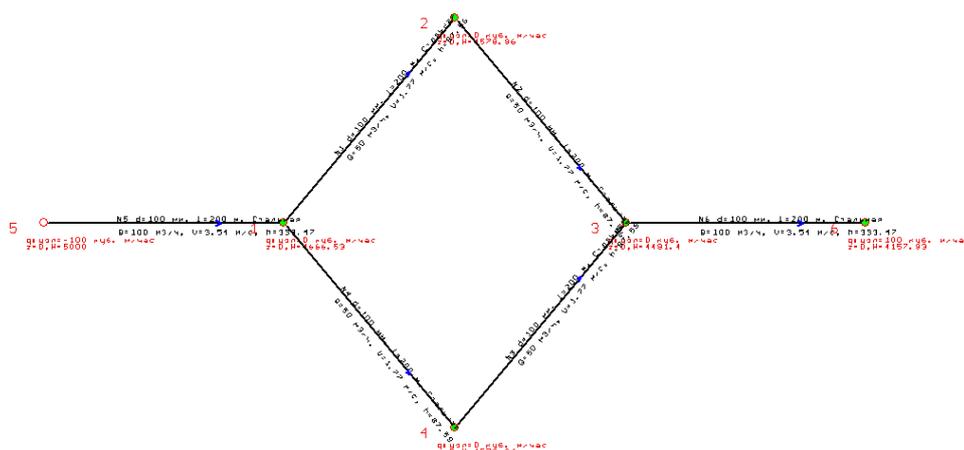


Рисунок 5.8. Контрольный пример 1. Простейшая мостиковая схема

В силу симметрии по каждому полукольцу должно протекать половина расчетного расхода, т.е. $50 \text{ м}^3/\text{час}$. При настройке расчетного модуля на точность увязки в пределах 0.05 Па по результатам расчета получаем искомый результат, потери давления на каждом участке кольца равны 43.79 Па , сумма потерь давления в кольце равна нулю. Суммарные потери давления до узла отбора (узел 6) составляют $5000 - 4578.95 = 421.05 \text{ (Па)}$.

Контрольный пример 2. Простейшая двухконтурная сеть. Сеть низкого давления
 Длина всех участков одинаковая и равна 100 метрам, диаметр – 100 мм. Узел подачи – 1, расчетная подача в узле 1 – $100 \text{ м}^3/\text{час}$. Расчетный отбор в узле 6 равен подаче ($100 \text{ м}^3/\text{час}$). Давление в точке подачи – 5000 Па .

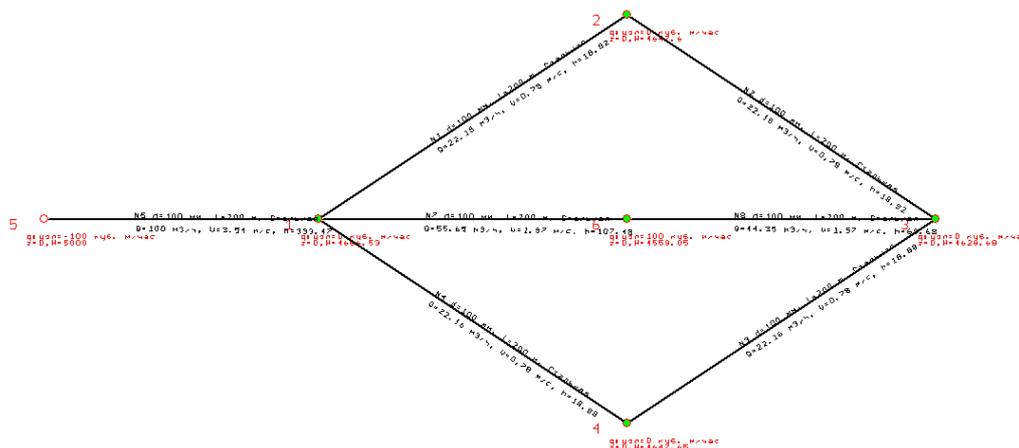


Рисунок 5.9. Контрольный пример 2. Простейшая двухконтурная сеть

По результатам расчета потокораспределения в сети для узла 6 выполняется балансовое соотношение по расходам: $55.65 + 44.35 - 100 = 0$, а также контурное соотношение для гидравлических потерь для любого кольца: $53.74 - 34.84 - 9.45 - 9.45 = 0$.

Контрольный пример 3. Восьмиконтурная сеть низкого давления.

Длина всех участков различна, диаметр – 100 мм. Узел подачи – 1, расчетная подача в узле 1 – 100 м³/час. Расчетный отбор в узле 16 равен подаче (100 м³/час). Давление в точке подачи – 5000 Па.

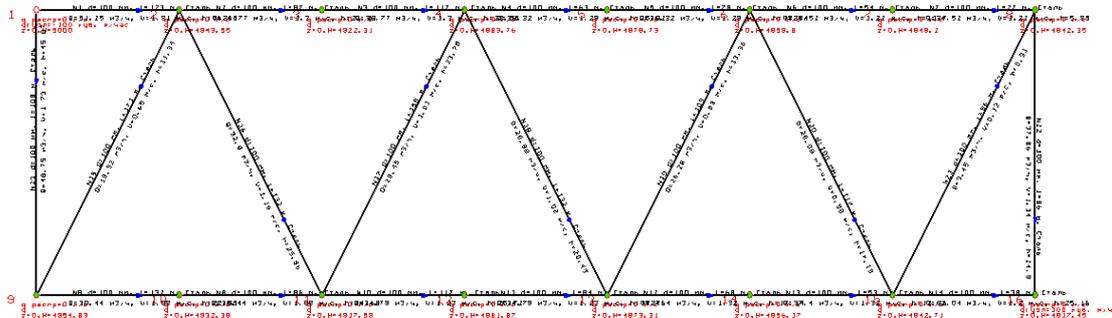


Рисунок 5.10. Контрольный пример 3. Восьмиконтурная сеть низкого давления

Для проверки корректности расчета достаточно проверить выполнение законов Кирхгофа в каждом кольце сети.

В качестве примера рассмотрим баланс потерь напора в первом (от узла подачи) малом кольце, последнем малом кольце и в большом кольце, 1-8-16-9.

Кольцо 1-2-9: $45.09 + 11.33 - 56.43 = 0.01$ Па

Кольцо 15-16-8: $0.31 + 24.87 - 25.18 = 0.00$ Па

Кольцо 1-8-16-9: $56.43 + 21.21 + 28.53 + 15 + 18.82 + 11.67 + 5.84 + 24.87 - 25.18 - 13.38 - 17.17 - 18.48 - 25.74 - 14.71 - 22.58 - 45.09 = 0.04$ Па

Контрольный пример 4. Восьмиконтурная сеть высокого давления

Длина всех участков равна 1000 м, диаметр – 100 мм. Узел подачи – 1, расчетная подача в узле 1 – 1000 м³/час. Расчетный отбор в узле 16 равен подаче (1000 м³/час). Давление в точке подачи – 600 000 Па. Погрешность увязки – 10 Па.

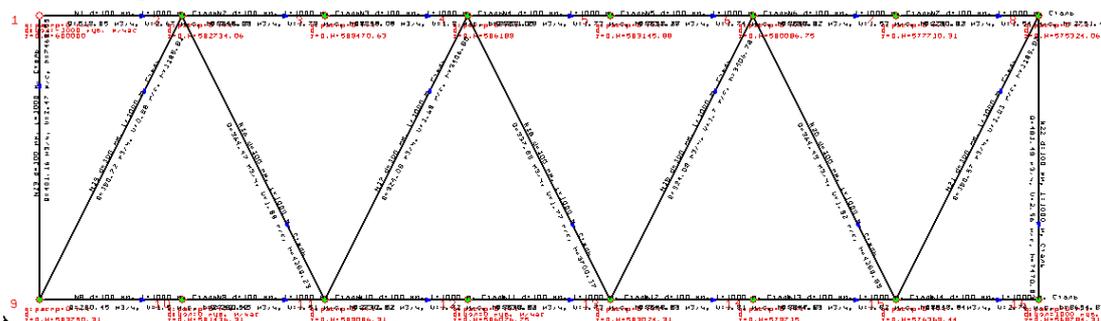


Рисунок 5.11. Контрольный пример 4. Восьмиконтурная сеть высокого давления

Поскольку программа указывает на участках значения не потерь напора, а разность квадратов давлений в начале и конце участка трубопровода (в МПа), то сначала определим потери давления, исходя из выданных программой давлений в узлах, на участках кольца:

1-2: $600\,000 - 592\,734.06 = 7265.94$ Па

2-9: $593\,750 - 592734.06 = 1015.94$ Па

9-1: $600\,000 - 593\,750 = 6250$ Па

Баланс потерь в кольце 1-2-9: $7265.94 - 1015.94 - 6250 = 0.00$ Па

Программа указывает на участках сети расход газа, приведенные к нормальным условиям, а скорости движения при этом соответствуют фактическому объемному расходу. Нормальные расходы газа удовлетворяют балансовому условию.

Для узла 1, например: $518.85 + 481.16 - 1000 = 0.01 \text{ м}^3/\text{час}$

Возьмем для примера узел из середины сети, например, узел 13: $330.82 + 337.89 - 324.08 - 344.63 = 0 \text{ м}^3/\text{час}$