Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

А. В. Некрасов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Текстовый электронный образовательный ресурс

Пособие по дисциплине «Информационные технологии в строительстве» по направлению подготовки 08.04.01 Строительство для образовательной программы «Водоснабжение и водоотведение городов и промышленных предприятий».

Подготовлено кафедрой гидравлики
Институт Строительства и архитектуры

Екатеринбург
2025

Содержание

Введение 3
1. Исходные данные 4
2. Настройка приложения 5
3. Шаблоны неравномерности 7
4. Изображение схемы сети и ввод ее параметров 10
5. Определение диаметров трубопроводов 13
6. Определение параметров насосов 15
7. Моделирование регулирования и управления насосами 19
8. Моделирование отключения трубопроводов 22
9. Определение параметров водонапорной башни 24
Заключение 28
Приложение 29
Библиографический список 32

Введение

Сейчас трудно представить, что в течение многих десятилетий инженеры проектировали сети водоснабжения без использования компьютеров, которые не только избавляют инженеров от необходимости выполнения рутинных, но и довольно сложных итерационных расчетов. Появилась возможность рассматривать значительно больше альтернативных вариантов проекта, нежели при ручных вычислениях.

Использование компьютерных приложений (программных комплексов) для моделирования работы сетей позволяет осуществлять комплексный подход к их проектированию, более приближенный к реальным условиям работы сетей.

Моделирование позволяет оценить работу сети водоснабжения в условиях, отличающихся от заложенных в проект первоначально, например, при изменении объемов потребления воды через несколько лет или при изменении свойств трубопроводов вследствие коррозии. С помощью модели можно оценить качество водоснабжения потребителей при отключении некоторых сегментов сети для проведения ремонта, а также решать ряд других задач.

Выбор программного продукта (далее – приложения) для расчета и моделирования работы сети не имеет принципиального значения. Главное условие – понимание логики работы выбранного приложения и наличие хотя бы начальных навыков работы в его среде. Далее предполагается, что читатель имеет некоторый опыт проектирования сетей водоснабжения традиционными методами и владеет соответствующей терминологией.

Процедура проектирования иллюстрируется на примере относительно простой сети водоснабжения населенного пункта с использованием свободно распространяемого приложения Epanet. Рассмотрены основные этапы работы:

– настройка приложения,

– подбор диаметров трубопроводов,

– выбор насосного оборудования и регулирования его работы,

– определение параметров накопителя (водонапорной башни).

Для лучшего понимания процедуры проектирования рекомендуется самостоятельно рассмотреть предложенный пример.

1. Исходные данные

Исходными данными для проектирования являются:

– схема сети;

– точки (узлы схемы) расположения насосной станции второго подъема и крупных потребителей;

– вертикальные (геодезические) координаты узлов;

– минимальное и максимальное значение свободного напора в узлах;

– уровень воды в питателе (резервуаре чистой воды – РЧВ);

– длины трубопроводов и материалы, из которых они изготовлены:

– суммарные объемы суточного водопотребления каждого вида (хозяйственно-питьевое, больницы, гостиницы, бани, прачечные, поливка зеленых насаждений и т. д.);

– расход воды на нужды промышленных предприятий и местной промышленности;

– коэффициенты или графики неравномерности водопотребления за расчетный период (обычно – сутки);

– допустимые значения свободных напоров у потребителей;

– допустимый объем неучтенного потребления (утечек).

Если сеть водоснабжения может быть использована при наружном (внутреннем) пожаротушении необходимо задать

– расчетное количество одновременных пожаров;

– расход воды на тушение одного пожара;

– продолжительность тушения пожара.

Далее порядок работы будет иллюстрироваться конкретным примером проектирования сети водоснабжения небольшого населенного пункта (городского района).

2. Настройка приложения

В большинстве приложений до начала проектирования достаточно выбрать систему единиц измерения, задать размерности величин и метод расчета линейных потерь напора в трубопроводах.

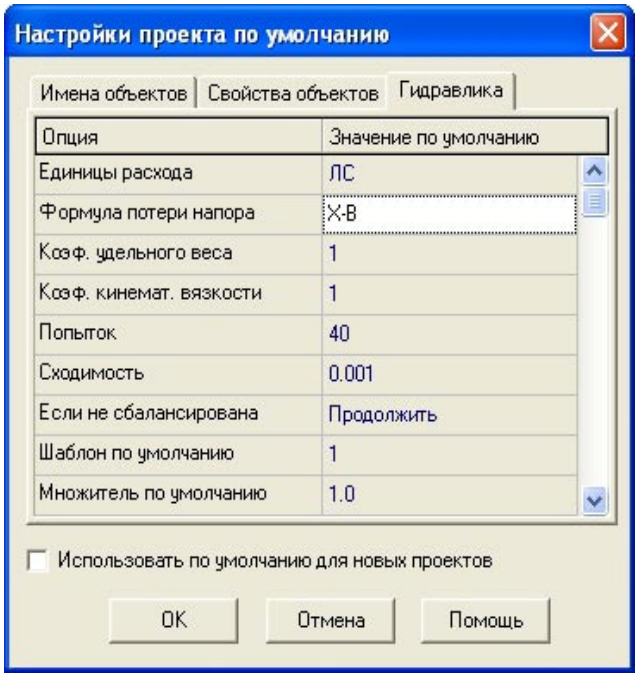
Необходимо иметь в виду, что некоторые приложения (в том числе Epanet) не позволяют пользователю изменять размерности величин в ходе проектирования.

Особое внимание следует уделить выбору метода расчета потерь напора, поскольку не все приложения предусматривают использование отечественных методик. Большинство приложений предоставляют возможность выбора одного из трех методов: Дарси-Вейсбаха (Д-В), Хазена-Вильямса (Х-В) и Шези-Маннига (Ч-М)*. Эти методы и используемые в них формулы основаны на экспериментальных данных и в одинаковых условиях дают очень близкие результаты расчета. Поэтому выбор метода в основном определяется личными предпочтениями пользователя.

Выбор метода расчета потерь определяет значение параметра, характеризующего шероховатость поверхности труб: абсолютная эквивалентная шероховатость (Д-В), *С*-фактор (Х-В) и коэффициент Маннинга (Ч-М). Значения этих параметров для некоторых видов труб приведены в табл. 1.

На рис. 1, *а* показан пример задания в качестве единицы измерения расхода литров в секунду (л/с), метода Хазена –Вильямса для расчета потерь напора и *С*-фактора для чугунных труб (рис. 1, *б)*.

а



б

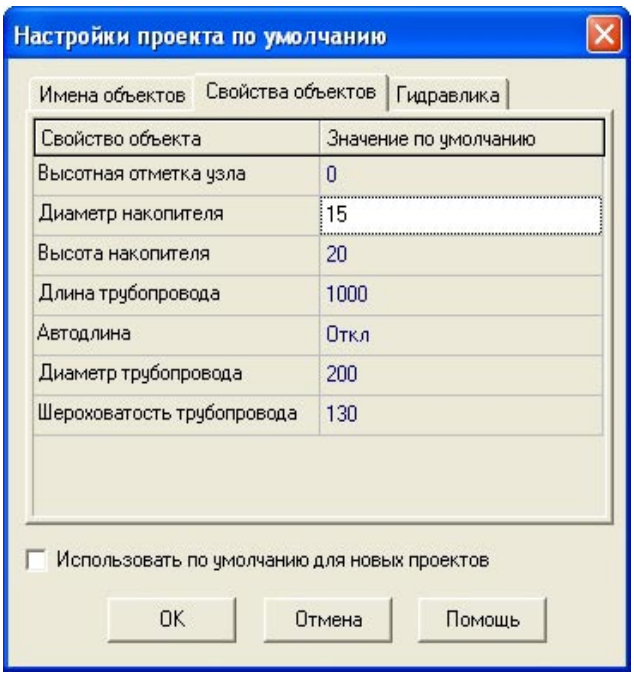


Рис. 1. Настройка параметров расчетов в среде Epanet:
а – вкладка *Гидравлика*; *б* – вкладка *Свойства объектов*

* Здесь и далее приняты обозначения и термины, принятые в русской версии Epanet

Строго говоря, необходимо также задать значения физических свойств жидкости (плотности и коэффициента вязкости). Обычно они задаются по умолчанию для воды и не требуют корректировки. На рис. 1, *а* указан коэффициент удельного веса (относительная плотность) воды и коэффициент ее вязкости в мм^2/с.

Различают два вида моделирования: статическое и динамическое. При статическом расчете параметры сети и расходы воды не изменяются во времени. При динамическом режиме приложение автоматически пересчитывает расходы (водопотребление) и выполняет расчеты через указанный пользователем интервал времени. Иными словами, динамический расчет – совокупность последовательных статических расчетов. Поэтому в некоторых приложениях динамический расчет называется квазистационарным.

Проектирование сети целесообразно выполнять в динамическом режиме. Для этого в приложении Epanet необходимо указать время моделирования, например равное 24 часам (строго говоря, продолжительность может быть любой). Интервал, через который приложение выполняет гидравлические расчеты сети (шаг), обычно принимают равным одному часу (рис. 2). Остальные параметры принимаются по умолчанию.

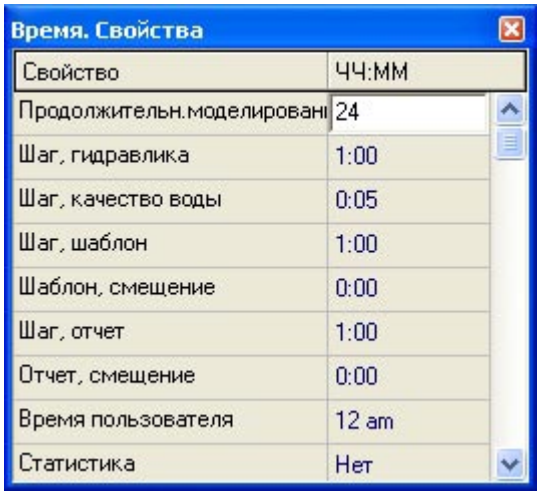


Рис. 2. Настройка параметров динамического моделирования в среде Epanet

Если необходимо выполнить статический расчет, продолжительность моделирования задается равной нулю.

3. Шаблоны неравномерности

При выполнении динамических расчетов для потребителей каждого вида должны быть введены шаблоны неравномерности потребления в течение заданного ранее времени моделирования (сутки).

При создании шаблонов необходимо учитывать смысл коэффициента суточной неравномерности. В отечественной практике проектирования этот коэффициент, $K_ч$, рассматривается как процент (доля) суточного расхода воды, потребляемой в течение того или иного часа. Таким образом, сумма всех значений $K_ч$ за сутки равняется 100 % [2].

В приложениях, разработанных за рубежом, к которым относится и Epanet, этот коэффициент, k_i, представляет собой отношение водопотребления, q_i, в течение того или иного часа, i, к среднему значению за сутки, q_0. Иными словами, расчетный период (сутки) разбивается на интервалы времени, в течение которых водопотребление потребителя данного вида считается неизменным. Таким образом,

$$q_i = k_i\, q_0.$$

В различных приложениях q_0 называется узловым или базовым расходом или отбором. Зависимость коэффициента k_i от времени, представленная в табличном виде, называется шаблоном неравномерности.

В приложении (табл. П1) приведены значения k_i для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В ней коэффициенты неравномерности указаны для различных значений коэффициента суточной неравномерности $K_ч$, определяемого по методике [3, п. 5.2]. Он учитывает количество жителей населенного пункта, степень благоустройства зданий, режим работы предприятий и другие местные условия.

В качестве примера на рис. 3 приведен шаблон неравномерности хозяйственно-питьевого водопотребления. Шаг изменения времени в шаблонах задается при настройке параметров динамического моделирования (см. рис. 2).

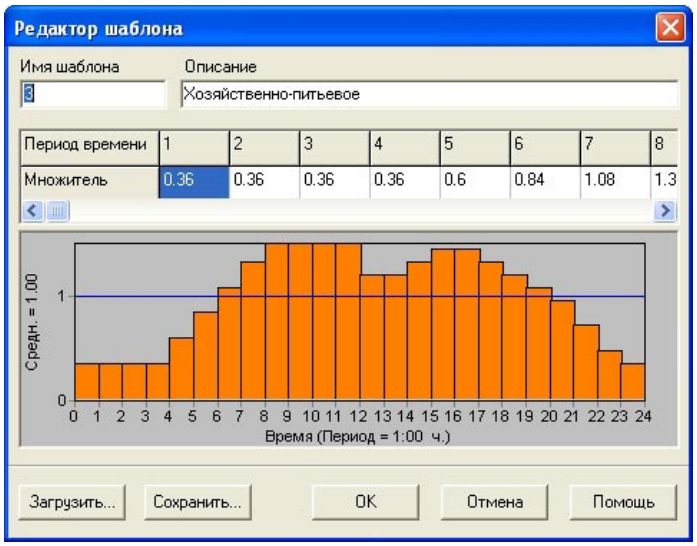


Рис. 3. Шаблон неравномерности хозяйственно-питьевого водопотребления для $K_ч = 1{,}5$ в среде Epanet

В табл. П2 приведены значения k_i для некоторых видов потребителей. Необходимо иметь в виду, что это ориентировочные экспериментальные величины, которые могут отличаться от реальных. В частности для бань, прачечных и других потребителей с фиксированным графиком работы необходимо учитывать реальные часы ее начала и окончания.

Если для каких-либо потребителей водопотребление можно с большой долей вероятности считать постоянным в течение рабочего времени, то принимается $k_i = 1$. В качестве примера на рис. 4 приведен шаблон неравномерности для потребителя «Ручной полив зеленых насаждений» в периоды с 5 до 8 и с 16 до 19 часов.

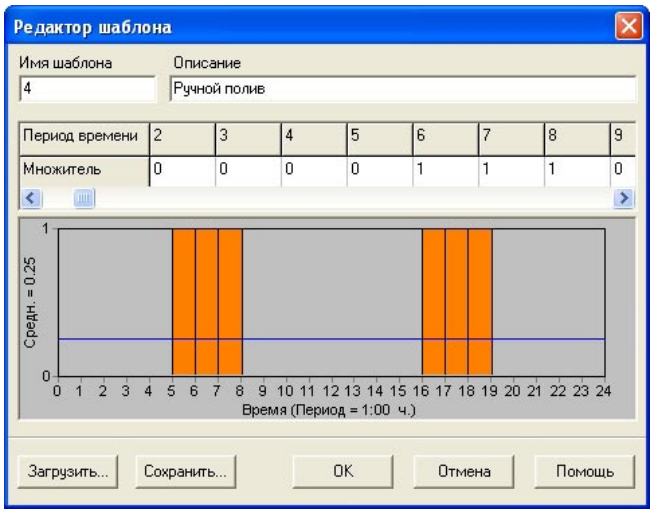


Рис. 4. Шаблон неравномерности для потребителей типа «Ручной полив зеленых насаждений» в среде Epanet

Аналогичным образом учитывается расход воды на пожаротушение (рис. 5). Время начала пожара, естественно, предугадать нельзя, поэтому шаблон необходимо откорректировать после определения часа наибольшего водопотребления сети и указать его в качестве времени начала тушения.

Если расход какого-либо потребителя не меняется в течение всего времени моделирования, то для него также необходимо создать шаблон при $k_i = 1$ с 0 до

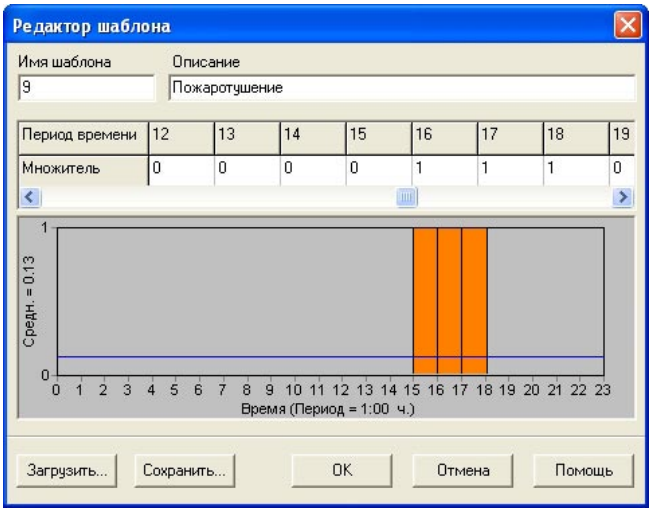


Рис. 5. Пример шаблона неравномерности для потребителей типа «Пожаротушение» в среде Epanet

24 часов. Таким способом обычно моделируют неучтенное водопотребление и утечки.

Для промышленных предприятий распределение расхода воды по часам суток можно задать лишь ориентировочно, поскольку на него влияет большое количество факторов: характер производства, количество работников и смен, их продолжительность и т. п. Эти факторы могут существенно меняться с годами, поскольку зависят от общей экономической ситуации в регионе. При такой неопределенности часто принимают $k_i = 1$ в течение всего времени водопотребления.

4. Изображение схемы сети и ввод ее параметров

Первоначально создается предварительная схема сети. Она включает распределительные и магистральные (подающие) трубопроводы, соединяющиеся в узловых точках из которых производится отбор воды потребителями, а также источник водоснабжения (РЧВ) из которого вода подается в сеть. На данном этапе параметры насосов еще не определены, поэтому на схеме они отсутствуют. Пример сети показан на рис. 6.

На схеме можно указывать не только основные трубопроводы, но и вспомогательные (фиктивные). Их используют, например, для удобства изображения схемы на экране. На рис. 6 это участок Ф2. Главное условие – пренебрежимо малое гидравлическое сопротивление таких участков. Это достигается заданием большого диаметра (например, 1 м) и малой длины (несколько миллиметров).

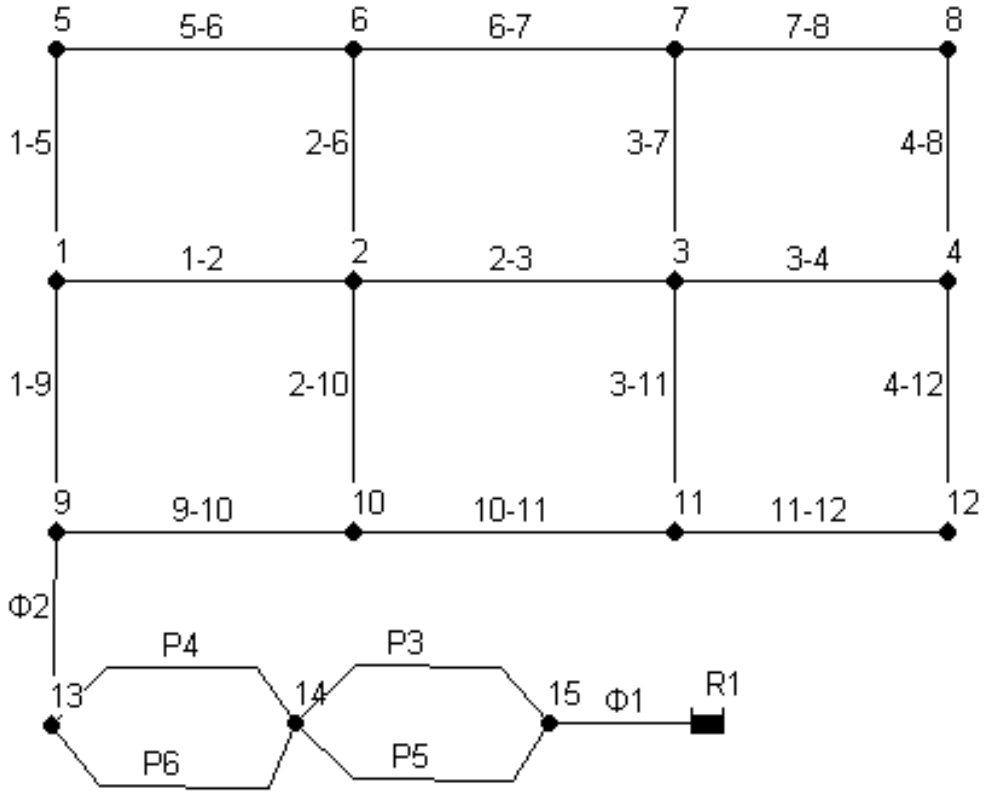


Рис. 6. Предварительная схема сети

Другие фиктивные участки используются для имитации местных потерь, например, в насосной станции (Ф1). Длина таких участков может быть любой, а диаметр будет определен в ходе дальнейших расчетов с целью достижения принятых значений потерь напора. В частности, потери напора в насосной станции обычно принимают равными 3 – 5 м.

Длины основных трубопроводов – заданные величины, определяемые на этапе трассировки сети. Их диаметры задаются равными минимально допустимым

значениям согласно нормативам: 100 мм, или 75 мм для небольших населенных пунктов.

Длины трубопроводов для рассматриваемого примера (см. рис. 6) приведены в табл. П3. Диаметры всех труб, кроме Ф2, 100 мм.

Высотные (геодезические) отметки узлов и источника воды также являются заданными величинами. Их значения для рассматриваемого примера показаны в табл. П4.

В каждом узле нужно задать значения расходов (отборов) q_0 и соответствующие шаблоны неравномерности.

Рассмотрим пример. Допустим, что в рассматриваемом случае суточный расход воды хозяйственно-питьевого назначения составляет 9994 м^3/сут. Его среднее часовое значение:

$$9994/24 = 416 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

С учетом принятой на этапе настройки приложения размерности расхода это составляет:

$$416/(3600\times10^{-3}) = 116 \text{ л/с}.$$

Данный расход следует тем или иным способом распределить по узлам сети. Довольно часто распределение осуществляют, предполагая равномерный отбор воды по длине того или иного трубопровода (см., например, [4]). Методика данного расчета здесь не рассматривается. При необходимости ее можно выполнить с использованием электронных таблиц (Excel, Calc и т. п.).

Здесь мы ограничимся простейшим способом распределения – равномерным. Иными словами, узловые отборы воды на хозяйственно-питьевые нужды во всех 12-ти узлах принимаются одинаковыми, т. е.:

$$q_0 = 116/12 = 9,67 \text{ л/с}.$$

Примем для определенности значение неучтенного водопотребления 10 % от общего (9994 м^3/сут) и равномерно распределим его по всем узлам т. е.:

$$q_0 = 0,97 \text{ л/с}.$$

Потребители, положение которых точно известно (сосредоточенные отборы), например, гостиницы, бани и т. п. следует «привязать» к ближайшему узлу сети. Для таких потребителей значения q_0 находятся путем деления их суточного водопотребления на число часов использования воды. Например, согласно табл. П2 для потребителя «Бани» это время составляет 11 часов, а для столовых – 16.

В данном примере рассматривает лишь один сосредоточенный отбор для потребителя «Гостиница», общее потребление воды которым составляет 100 м^3/сут. Таким образом:

$$q_0 = 100/(24\times3600\times10^{-3}) = 1,16 \text{ л/с}.$$

Это правило применяется не только для сосредоточенных, но и для равномерно распределенных отборов, к которым можно отнести, например, «Ручной полив зеленых насаждений». Согласно шаблону на рис. 4 это время составляет 6 часов.

Для удобства последующего ввода данных найденные значения q_0 и соответствующие им шаблоны неравномерности для каждого узла рекомендуется

представить в виде табл. 2. На рис. 7 показан пример ввода узловых отборов в узле 8.

Таблица 6

Пример таблицы узловых отборов

Обозначение узла	Узловой отбор q_0, л/с	Шаблон неравномерности (номер)
1, 2... 7, 9, 10... 12	9,67	Хозяйственно-питьвое (3)
	0,97	Неучтенное потребление (7)
8	9,67	Хозяйственно-питьвое (3)
	0,97	Неучтенное потребление (7)
	1,16	Гостиница (1)
13, 14, 15	0	–

Примечание. Указание номера шаблона обусловлено особенностями приложения Epanet.

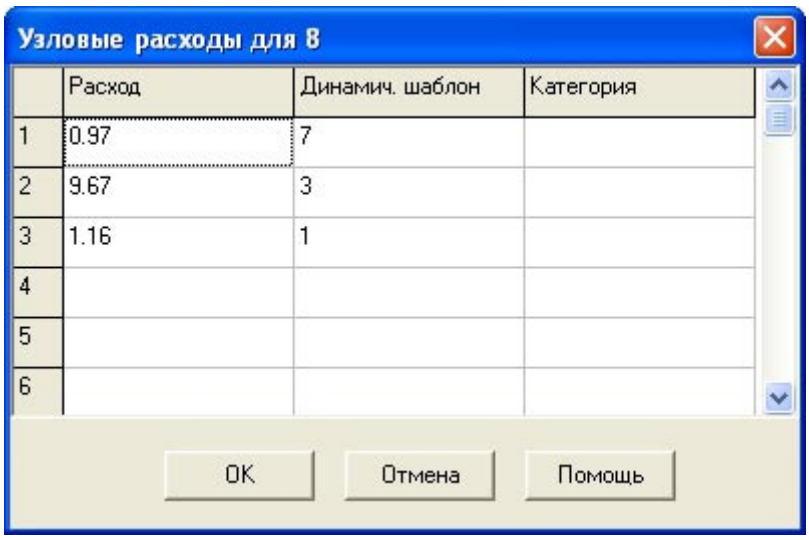


Рис. 7. Узловые отборы в узле 8 в среде Epanet

Количество шаблонов (потребителей) в узлах не ограничено, суммарный узловой расход в каждый час определяется автоматически.

5. Определение диаметров трубопроводов

Диаметры трубопроводов системы должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечивались заданные значения свободных напоров у потребителей (в узлах сети) и допустимые скорости движения воды в трубах. Строго говоря, выбор диаметров нужно осуществлять с учетом экономических факторов: стоимости труб из выбранного материала имеющейся номенклатуры, затрат на их прокладку, стоимости электроэнергии, затрачиваемой на перекачивание воды, КПД насосов.

В общем случае решение такой задачи осуществляется с использованием алгоритмов многомерной оптимизации. Далеко не каждое приложение имеет в своем составе такие инструменты.

В простейших случаях при выборе диаметров труб можно ориентировать на «экономические» скорости течения воды, т. е. находящихся в диапазоне 0,7–1,5 м/с в час наибольшего водопотребления. Подбор диаметров осуществляется вручную.

Час максимального водопотребления можно определить по графику изменения расхода в трубопроводе, через который вода подается в сеть. Для рассматриваемого примера это трубопровод Ф2. График строится после выполнения динамического расчета сети (рис. 8).

Заметим, что поскольку насосы еще не установлены, во многих узлах сети свободные напоры (давления) могут иметь отрицательные значения. Поскольку в реальных сетях это не допускаются, приложение выдает соответствующее предупреждение, которое на данном этапе проектирования следует игнорировать.

График показывает, что максимальный расход достигается в 9 и 11 часов. Согласно расчету его величина составляет 187,1 л/с.

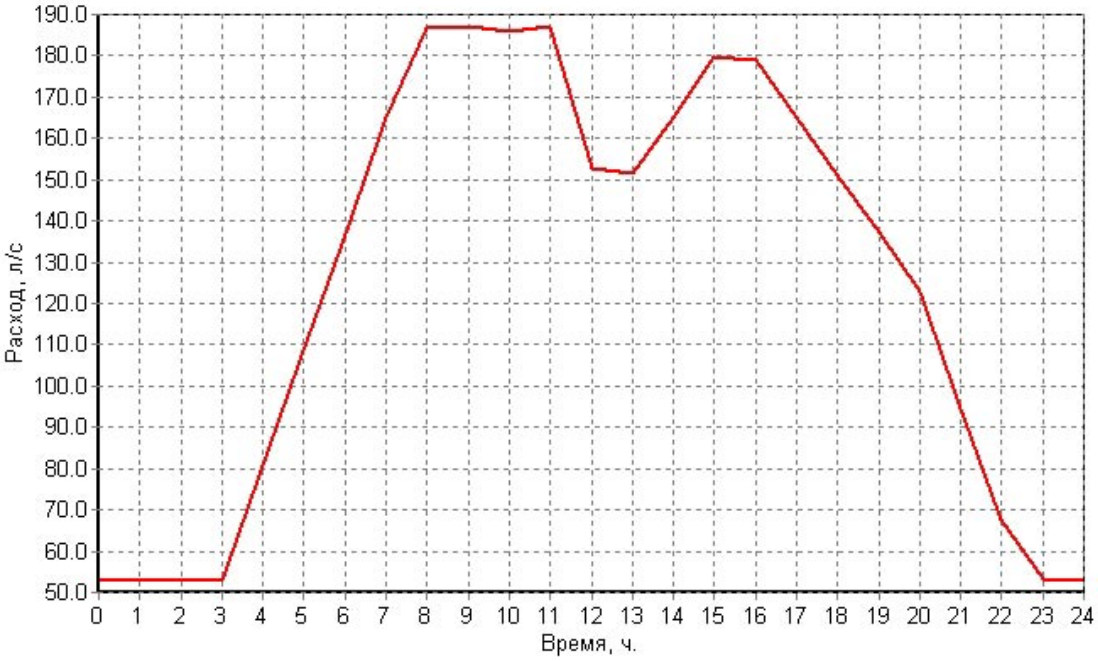


Рис. 8. Изменение расхода воды, поступающей в сеть, в течение суток

Для подбора диаметров в приложении Epanet целесообразно использовать инструмент «Калибровка». Для его использования необходимо предварительно с помощью программы Блокнот, входящей в состав ОС компьютера, создать текстовый файл с расширением dat. Он состоит из 3-х колонок: обозначение трубопровода, час, максимальная скорость. Разделителем является символ табуляции (Tab). Фрагмент файла и окно его подключения к проекту показаны на рис. 9*.

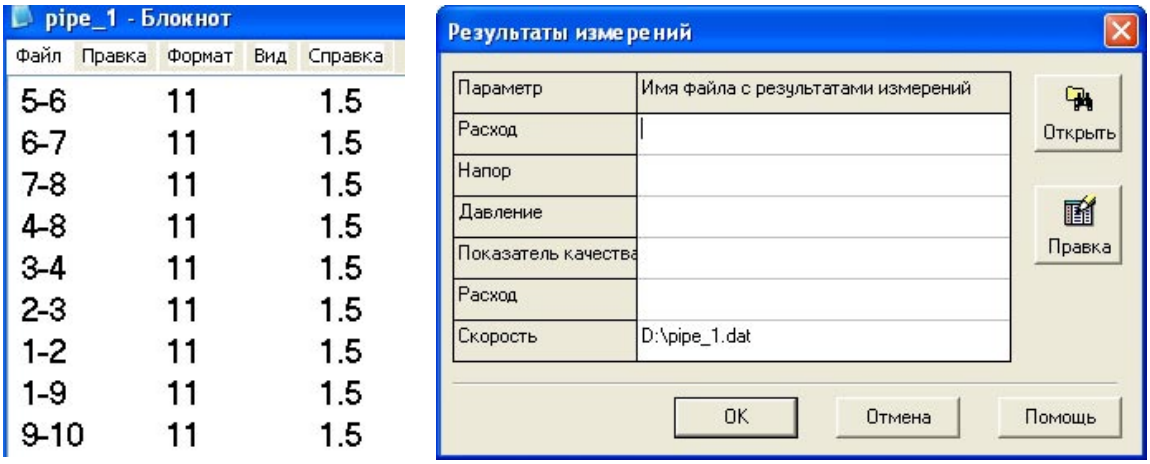


Рис. 9. Фрагмент калибровочного файла типа dat и его подключение к проекту в среде Epanet

Как отмечено выше диаметры труб приходится подбирать в ручную.

В Epanet результаты подбора диаметров на каждом шаге расчетов контролируются с помощью пункта меню Отчет – Калибровка (рис. 10).

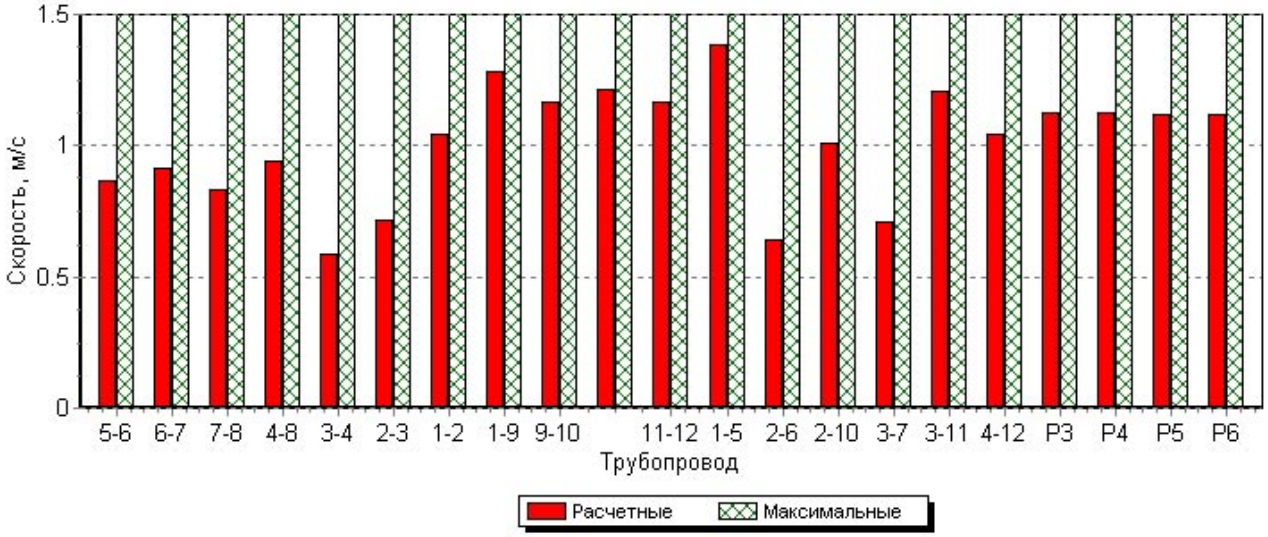


Рис. 10. Отчет о скоростях воды в трубах в среде Epanet

Диаметр фиктивного трубопровода Ф1, имитирующего потери напора в насосной станции, подбирается отдельно так, чтобы в 9 часов они составляли 3 – 5 м. В данном примере этому условию удовлетворяет диаметр 400 мм при длине трубы 1 м.

* В Epanet файл dat подключается к проекту с помощью пункта меню Проект – Измерения.

6. Определение параметров насосов

При использовании приложений для моделирования работы сетей водоснабжения параметры насосов проще всего определить подбором напора в источнике (уровня воды в РЧВ), при котором напоры в узлах не снижаются ниже допустимого значения.

С этой целью, используя средства приложения, нужно построить графики изменения свободных напоров в нескольких узлах, среди которых вероятнее всего находится диктующая точка сети. Такими узлами обычно являются узлы, наиболее удаленные от источника, а также имеющие максимальные высотные отметки.

Далее необходимо выполнить серию расчетов при различных напорах воды в источнике и определить его значение, удовлетворяющее заданному условию.

Применительно к рассматриваемому случаю, возможными «кандидатами» на роль диктующей точки являются узлы 4, 7, 8 и 12. Расчеты показали, что в наихудших условиях находится узел 8.

Будем считать, что минимальное значение свободного напора в сети составляет 20 м. Это требование выполняется для узла 8 при напоре в источнике 123 м. (рис. 11).

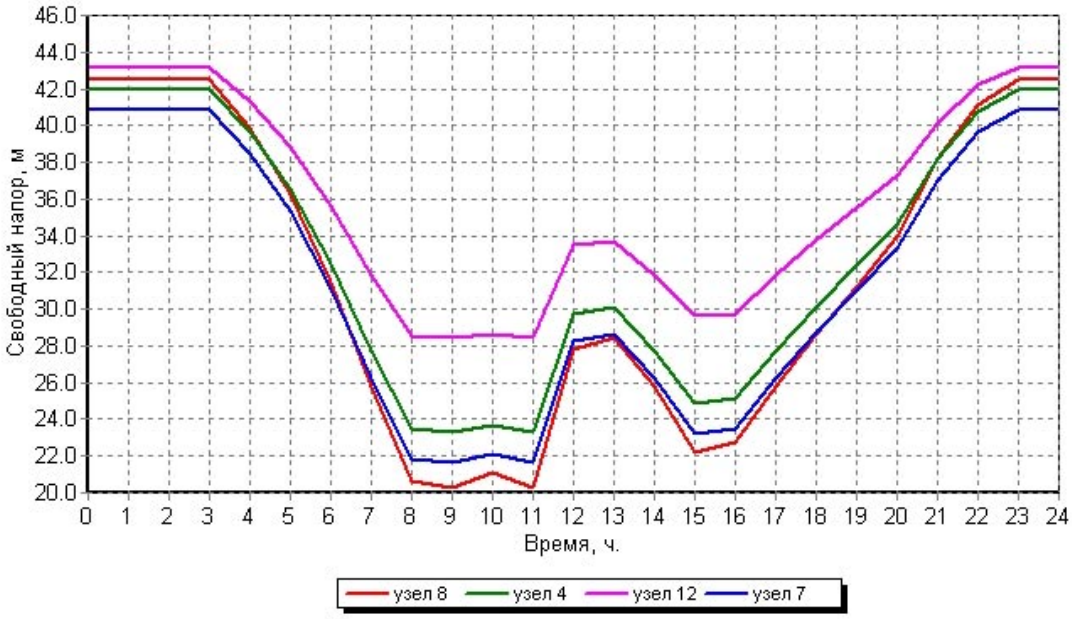


Рис. 11. Изменение свободного напора в некоторых узлах сети при напоре в источнике 123 м

Напор, который должны создавать насосы, определяется как разность найденного напора в источнике (РЧВ) и его заданного значения (80 м):

$$H_р = 123 - 80 = 43 \text{ м}.$$

Подача одного насоса равняется величине максимального водопотребления (см. п. 5), деленному на количество параллельно работающих насосов (например, 2):

$$Q_р = 187/2 \approx 94 \text{ л/с}.$$

Найденные значения подачи $Q_р$ и напора $H_р$ принимаются в качестве рабочей точки насоса и используются для предварительной оценки работы сети.

С этой целью, используя средства приложения, необходимо задать расходно-напорную характеристику насоса. В качестве первого приближения ее задают в виде зависимости:

$$H = a + bQ^2.$$

Коэффициенты a и b определяются Epanet автоматически по двум точкам данной кривой: одной из них является точка с заданными параметрами $H_р$ и $Q_р$. Вторая точка имеет координаты $H = 0$, $Q = 2Q_р$ (рис. 12).

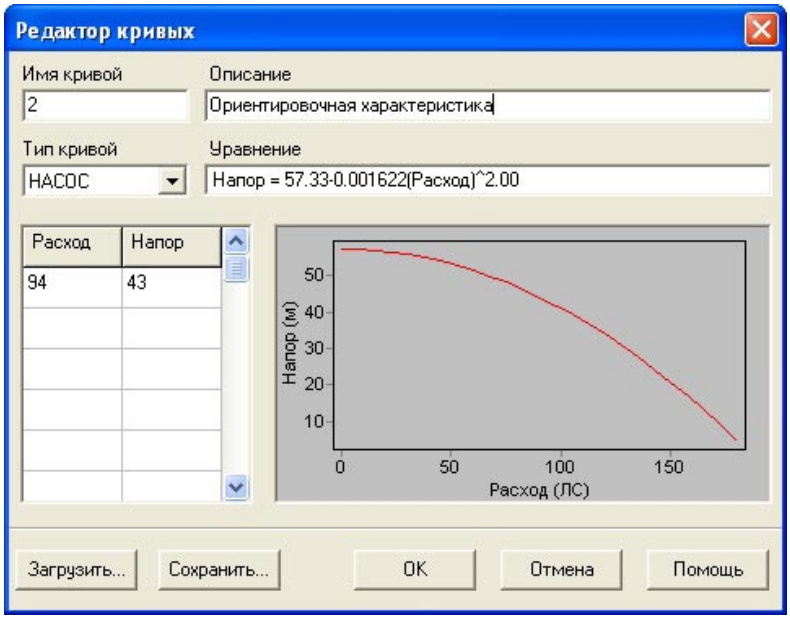


Рис. 12. Приблизительная характеристика насоса в среде Epanet

Далее следует дополнить схему сети насосами, назначив им данную расходно-напорную характеристику. При необходимости на схеме можно использовать фиктивные участки (рис. 13). На рис. 14 показаны графики изменения свободного напора в узле 9 (на входе воды в сеть) и в диктующей точке 8.

Выбор реальных насосов осуществляется по каталогам производителей. Их расходно-напорные характеристики должны быть близки к найденной зависимости. Рекомендуется рассмотреть несколько вариантов.

В рассматриваемом примере одним из возможных насосов является агрегат Д320-50 с диаметром рабочего колеса 405 мм. Его расходно-напорная характеристика показана на рис. 15. Характеристика вводится в соответствующем разделе приложения по точкам данного графика. Количество точек не ограничивается, но следует принимать во внимание особенности аппроксимации приложением этих данных.

Опыт использования приложения Epanet показывает, что при вводе характеристики достаточно ограничиться вводом координат 3-х точек с ниспадающей части расходно-напорной характеристики. В этом случае приложение строит характеристику в виде зависимости:

$$H = a + bQ^c.$$

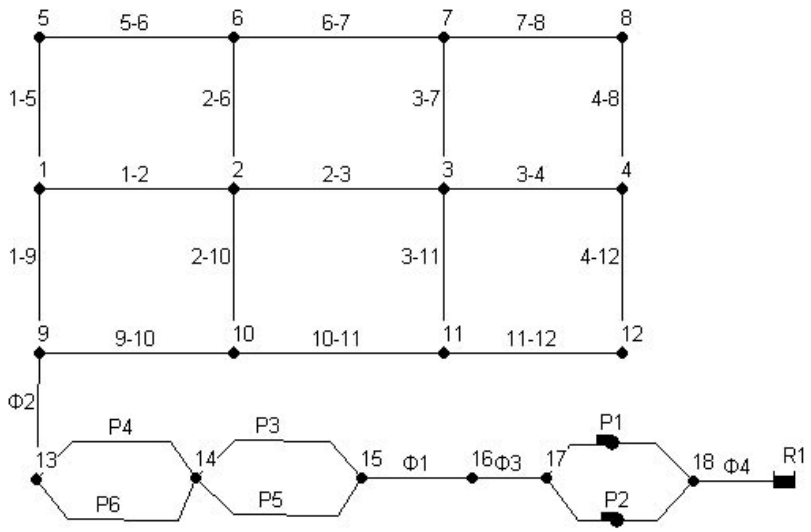


Рис. 13. Уточненная схема сети

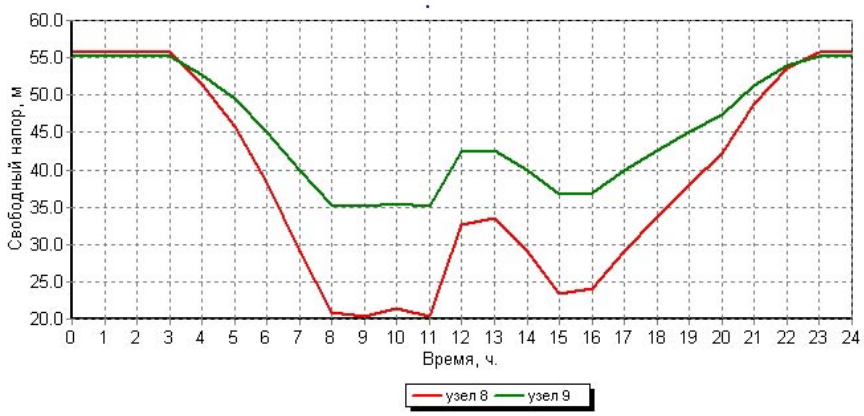


Рис. 14. Изменение свободного напора в некоторых узлах сети при насосной подаче воды

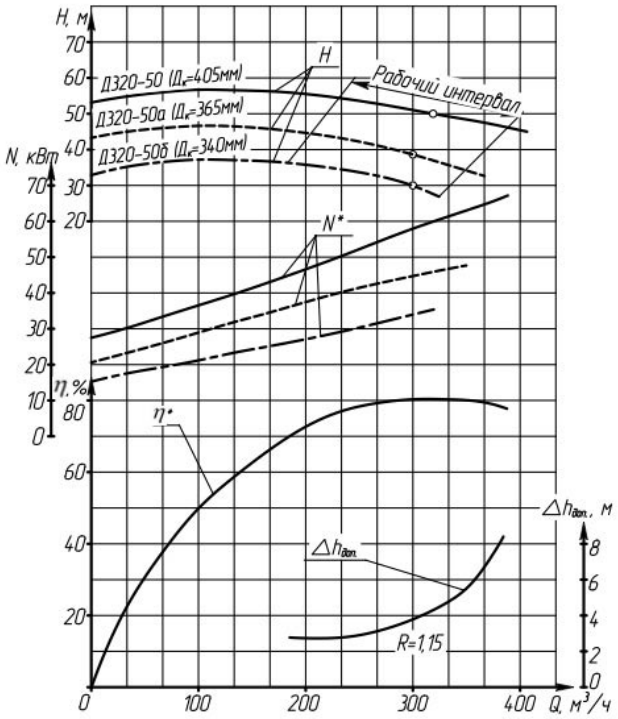


Рис. 15. Характеристики насосов Д320-50

Результаты расчета напоров в некоторых узлах рассматриваемой сети при использовании указанного насоса показаны на рис. 16.

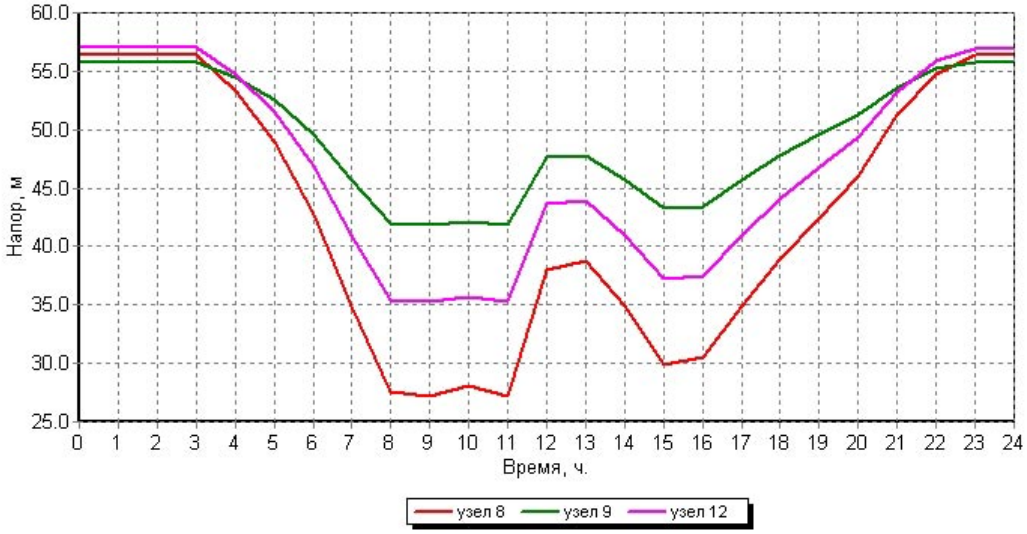


Рис. 16. Изменение свободного напора в некоторых узлах сети при использовании насосов Д320-50 (405 мм)

С целью оценки количества энергии, затрачиваемой на перекачивания воды, необходимо ввести зависимость КПД (η на рис. 15) от расхода (рис. 17).

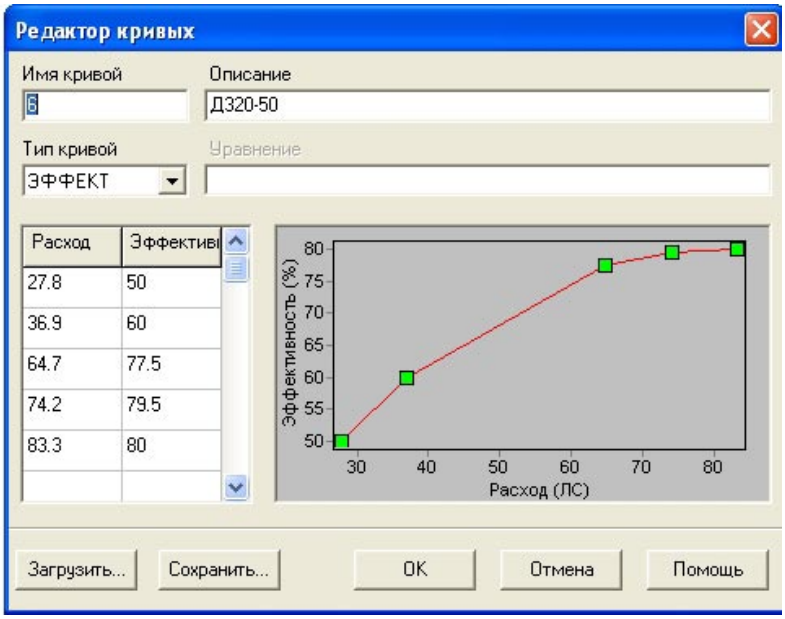


Рис. 17. Зависимость КПД насоса Д320-50 от расхода в среде Epanet

Расчет показал, что потребление электроэнергии насосной станцией составляет 2123 кВт в сутки при среднем КПД насосов 71%.

7. Моделирование регулирования и управления насосами

Приложения для моделирования работы сетей водоснабжения предоставляют пользователям возможность проверить использование различных регуляторов, а также правил управления элементами сети.

Как видно на рис. 16, в некоторые моменты времени свободный напор в сети может превышать 55 м. Это обусловлено особенностью расходно-напорной характеристики центробежных насосов – при уменьшении производительности создаваемый напор увеличивается.

Для уменьшения давления воды на выходе из насосной станции применяют редукционные клапаны. Такой клапан не допускает превышения давления в потоке ниже по течению (за собой) сверх заданного при его настройке.

В приложении Epanet все регуляторы обозначаются термином «задвижка». Конкретный вид регулятора указывается в строке *Тип* окна настройки его параметров. В частности, редукционный клапан обозначается ОДВ (рис. 18).

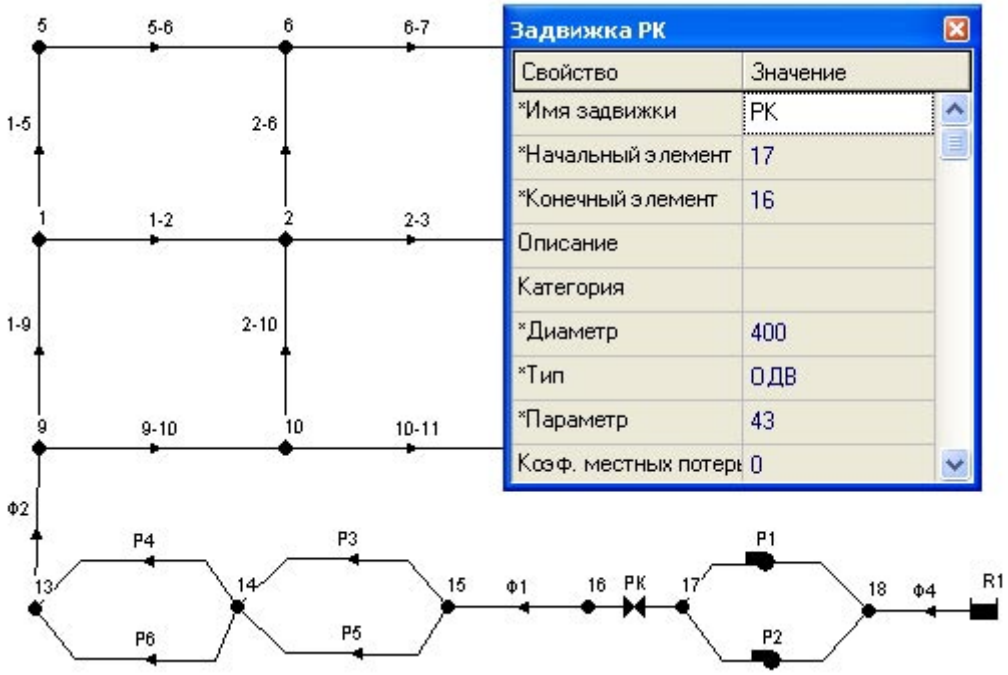


Рис. 18. Настройка редукционного клапана (ОДВ) в среде Epanet

На рис. 19 представлены результаты расчета давлений в некоторых узлах при давлении настройки клапана 43 м.

Применение логических правил рассмотрим на примере управления насосами. Сравнение графиков изменения потребления воды в течение суток и расходно-напорной характеристики насоса (см. рис. 8 и рис. 15) показывает, что в ночные часы требуемая подача воды может быть обеспечена одним насосом.

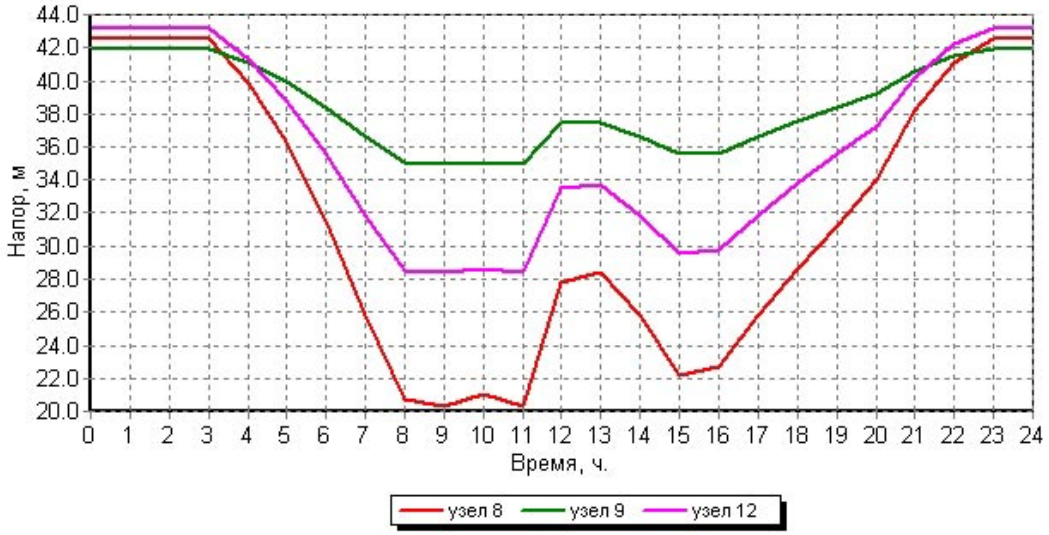


Рис. 19. Изменение свободного напора в некоторых узлах сети при использовании насосов Д320-50 (405 мм) и редукционного клапана

В среде Epanet управление насосом в зависимости от величины общего потребления воды системой (System demand) описывается правилом (RULE):

RULE 1
IF SYSTEM DEMAND < 130
THEN PUMP P1 STATUS IS CLOSED
ELSE PUMP P1 STATUS IS OPEN

Таким образом, насос P1 отключается, если потребление воды будет меньше 130 л/с (подобрано опытным путем). В противном случае он включен. Насос P2 включен постоянно.

График на рис. 20 показывает изменение расходов насосов, а рис. 21 – изменение давлений в некоторых узлах сети. Как видно, насос P1 отключен в период с 21 часа до 6 часов утра.

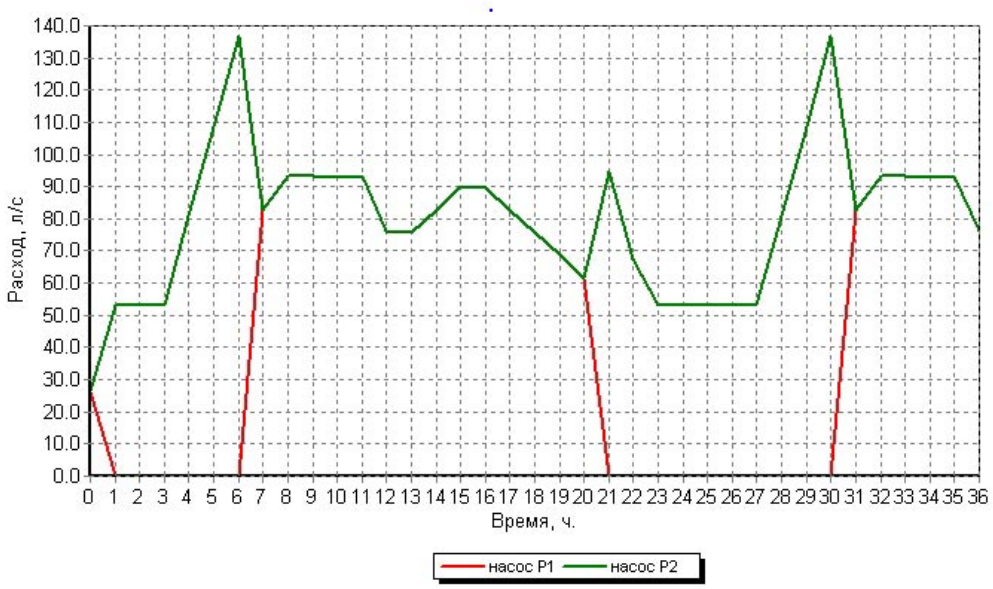


Рис. 20. Изменение подачи насосов при использовании правила управления насосом P1

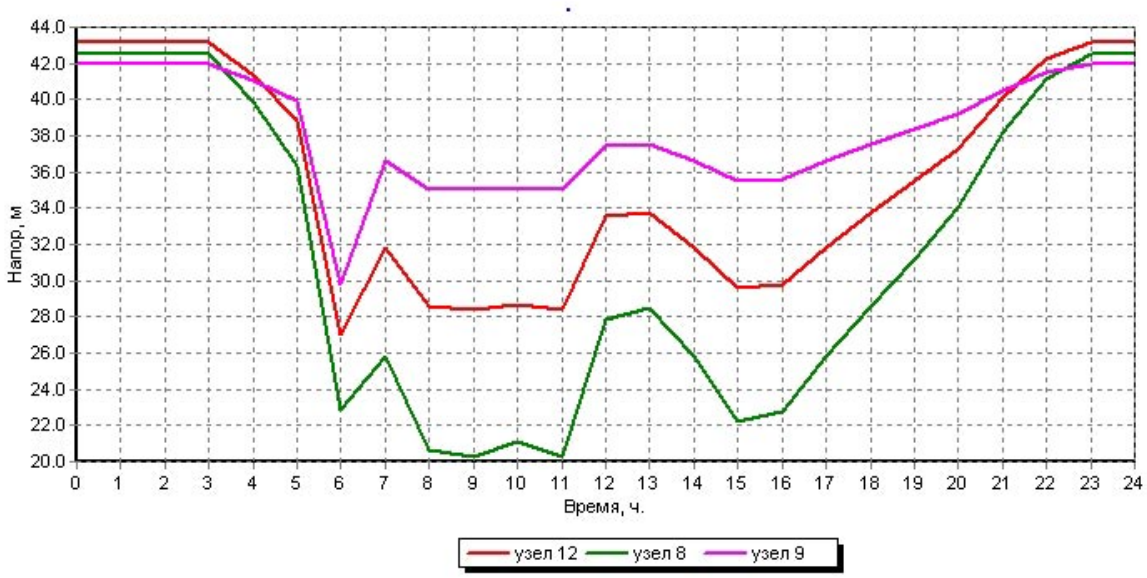


Рис. 21. Изменение свободного напора в некоторых узлах сети при использовании насосов Д320-50 (405 мм), редукционного клапана и правила управления насосом Р1

При использовании правила управления среднее значение КПД насоса Р1 составляет 79%, а насоса Р2 – 77%. Потребление электроэнергии насосной станцией составляет 1888 кВт в сутки, т. е. снижается на 11%.

8. Моделирование отключения трубопроводов

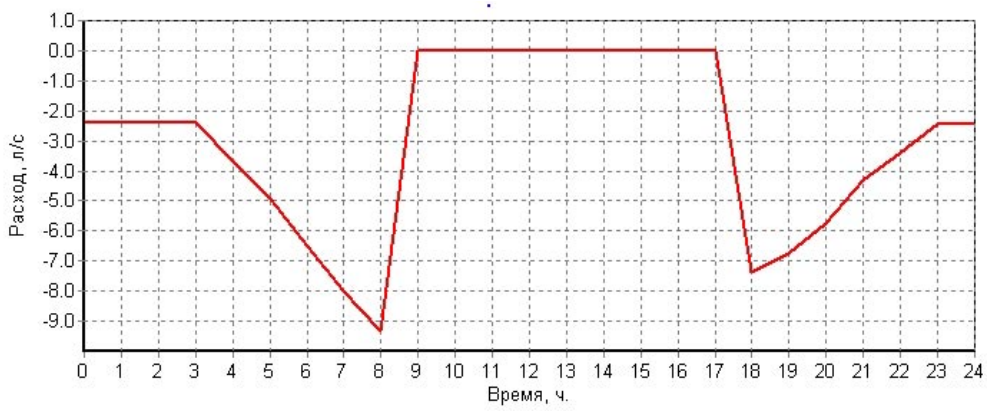
При работе любой сети водоснабжения возможно возникновение нештатных ситуаций. Одна из них – временное отключение каких-либо трубопроводов в связи с ремонтом. Любое приложение позволяет проанализировать работу сети в этих случаях.

В качестве примера рассмотрим отключение трубопровода 4-8 (см. рис. 13). Прежде всего, заметим, что можно задать состояние (открыт / закрыт) трубопровода в течение всего времени моделирования. Мы рассмотрим использование правила, которое позволит отключить трубопровод (LINK) на определенное время, например с 8 часов утра (AM) до 6 часов вечера (PM). В среде Epanet оно записывается следующим образом:

```
RULE 2
IF SYSTEM CLOCKTIME > 8 AM
AND SYSTEM CLOCKTIME < 6 PM
THEN LINK 4-8 STATUS IS CLOSED
ELSE LINK 4-8 STATUS IS OPEN
```

Результаты расчета расхода в трубопроводе 4-8 и свободного напора в некоторых узлах показаны на рис. 22. Как видно, качество водоснабжения существенно ухудшается лишь в узле 8.

а



б

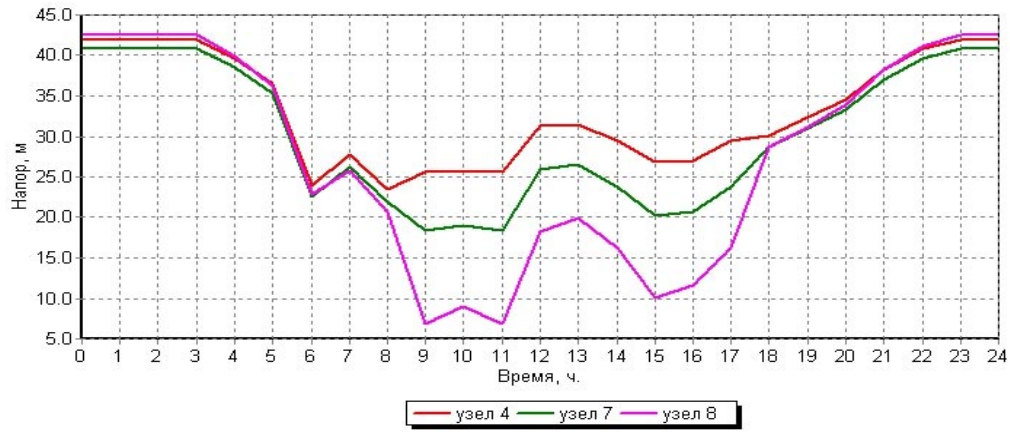


Рис. 22. Результаты расчета расхода в трубопроводе 4-8 (а) и свободных напоров в некоторых узлах при временном отключении трубопровода 4-8)

В тех случаях, когда отключают один из водоводов (Р3, Р4, Р5 или Р6 на рис. 18) ухудшается работа всей сети. Однако в этом случае допускается временное снижение потребления, но не более чем на 30%.

Выполнение этого условия в Epanet позволяет параметр настройки приложения *Множитель по умолчанию* (см. рис. 1, а). Задавая различные значения этого параметра можно уменьшать или увеличивать одновременно все величины узловых отборов q_0.

Закроем, например, водовод Р4 (рис. 23). Расчет показывает, что при заданных значениях q_0 свободный напор в некоторые моменты времени становится меньше допустимого (20 м). Если же задать *Множитель по умолчанию* равным 0,8, то свободный напор будет находиться в заданных пределах (рис. 24).

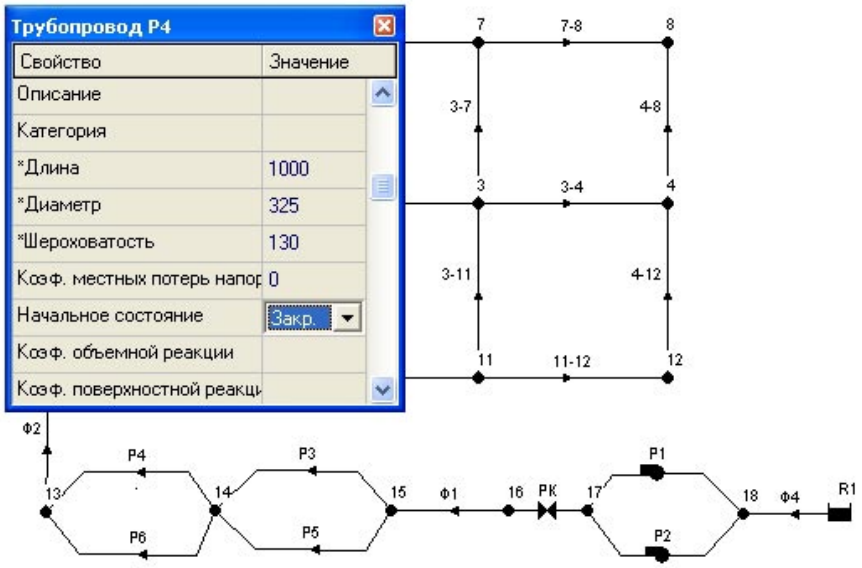


Рис. 23. Задание начального состояния трубопровода

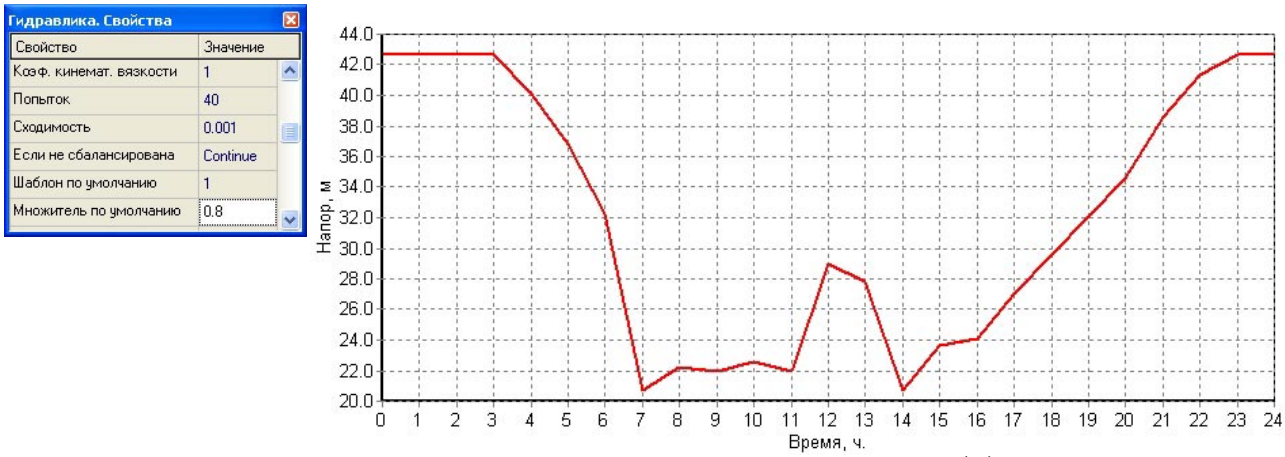


Рис. 24. Изменение свободного напора в диктующей точке (8) при уменьшении общего водопотребления на 20 % и закрытом водоводе Р4

9. Определение параметров водонапорной башни

В системах водоснабжения используются емкости различного назначения, предназначенные для хранения запасов воды, регулирования подачи и напоров. Некоторые приложения сетей позволяют моделировать работу различных видов таких емкостей: водонапорных башен, гидропневматических аккумуляторов, водонапорных колонн.

С помощью приложения Epanet возможно исследовать работу емкостей с переменным уровнем воды, которые называются накопителями. На рис. 25, показаны основные параметры накопителя:

– высотная отметка $H_Б$ – уровень наиболее низкой части накопителя – дна; отсчитывается от общей для всех узлов горизонтальной плоскости:

$$H_Б = z_Б + H_{ст},$$

где $z_Б$ – геодезическая отметка в точке установки накопителя, $H_{ст}$ – высота столба накопителя;

– минимальный H_{min} и максимальный H_{max} уровни воды; отсчитываются от дна накопителя;

– начальный уровень – уровень воды в момент начала моделирования (любое значение между минимальным и максимальным уровнем).

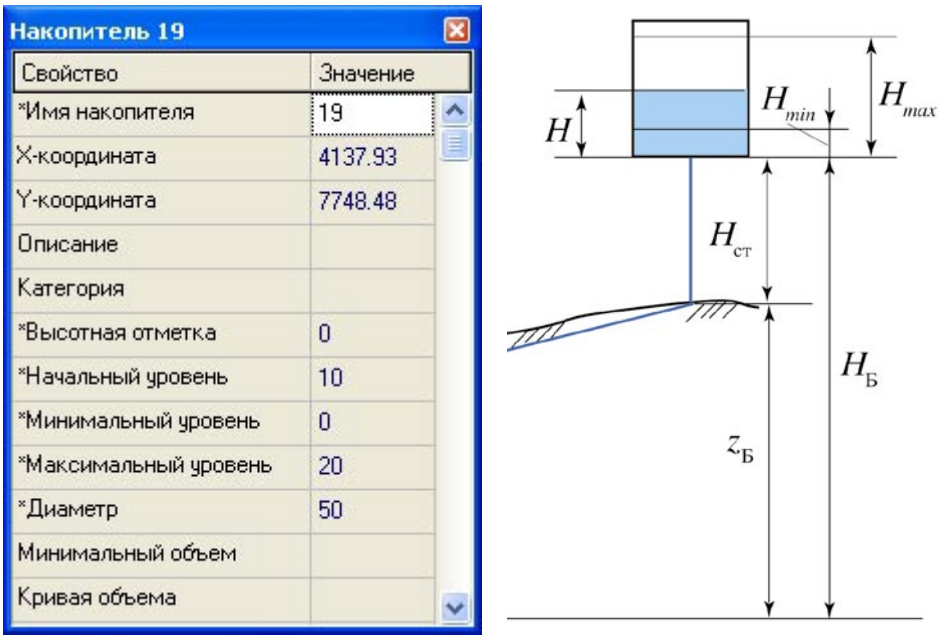


Рис. 25. Схема накопителя в среде Epanet

При выполнении расчетов необходимо иметь в виду, что приложение автоматически прекращает подачу воды в накопитель при достижении максимального уровня. При достижении минимального уровня прекращается отвод воды из накопителя.

Величина диаметра, d, зависит от формы накопителя. Для цилиндрических накопителей круглого сечения (принимается по умолчанию) – реальный диаметр. Для сечения другой формы – эквивалентный диаметр круга, площадь которого равна площади данного сечения. Например, если сечение прямоугольное и имеет размеры $a \times b$, то соответствующий диаметр:

$$d = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}.$$

Пользователь имеет возможность задать зависимость объема воды в накопителе от ее уровня с помощью соответствующего шаблона. В этом случае значение диаметра не принимается во внимание.

Определение объема накопителя здесь не рассматривается и считается заданным. Заданной величиной считается также объем противопожарного запаса воды. Таким образом, в ходе моделирования должны быть определены все высоты и диаметр накопителя.

Высоту башни $H_Б$ можно в первом приближении можно оценить как сумму высоты расположения диктующей точки $z_д$ и требуемой величины свободного напора в ней $H_{дт}$:

$$H_Б = z_{дт} + H_{дт}.$$

В рассматриваемом примере диктующая точка – 8, и высота $z_{дт} \approx 78$ м. Минимально допустимая величина свободного напора $H_{дт} = 20$ м. Таким образом,

$$H_Б \approx 78 + 20 = 98 \text{ м}.$$

Высота H_{max} определяется заданным объемом воды в накопителе W и его диаметром d. Обычно рекомендуется [4] принимать величину отношения $H_{max}/d =$ 0,5 – 1,0. Очевидно, что даже при заданном объеме W одна из величин должна быть задана. Пусть в рассматриваемом примере $W = 900$ м^3. Примем для определенности $H_{max} = 9$ м. Тогда $d = 11,3$ м.

Установим накопитель на схеме и соединим его с узлом 8 трубопроводом с диаметром 219 мм, длиной 200 м (рис. 26).

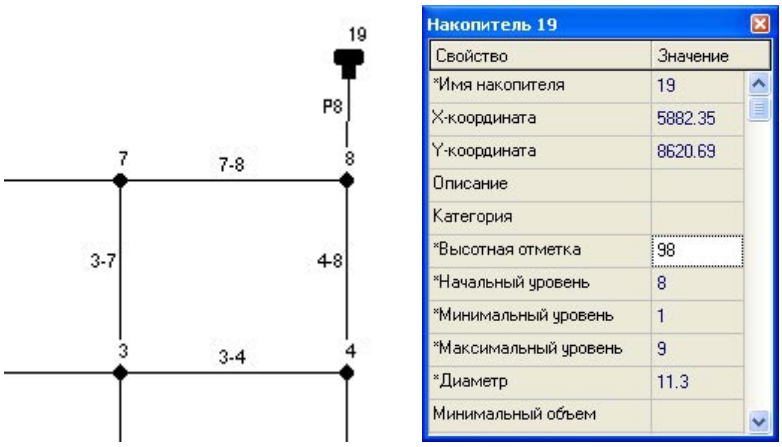


Рис. 26. Фрагмент схемы с накопителем и его параметры в среде Epanet

Зададим также H_{min} = 1 м и начальное значение уровня 8 м. Время моделирования необходимо увеличить хотя бы до 100 часов, что необходимо для стабилизации амплитуды колебаний уровня воды в накопителе в процессе моделирования.

График изменения уровня воды в накопителе* (рис. 27) показывает, что периодически достигается его максимальное значение. В этом случае накопитель не выполняет регулирующую функцию. Таким образом, необходимо увеличить высотную отметку $H_Б$.

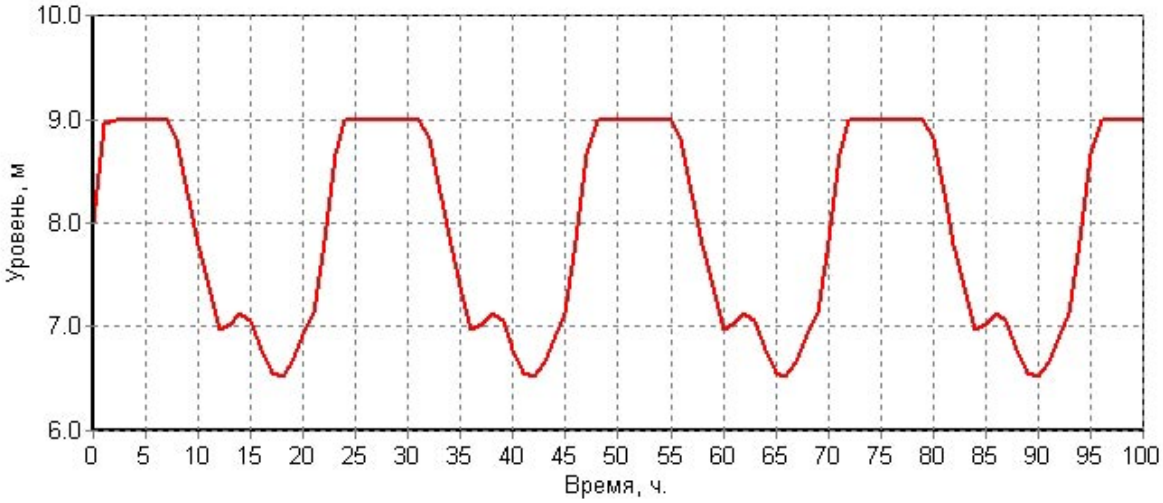


Рис. 27. Изменение уровня воды в накопителе при $H_Б$ = 98 м

После выполнения серии расчетов с различными значениями этой высоты можно установить, что изменение уровня находится в заданных пределах при $H_Б$ = 104 м (рис. 28). При этом уровень воды в накопителе меняется в диапазоне 2,8 – 8,9 м.

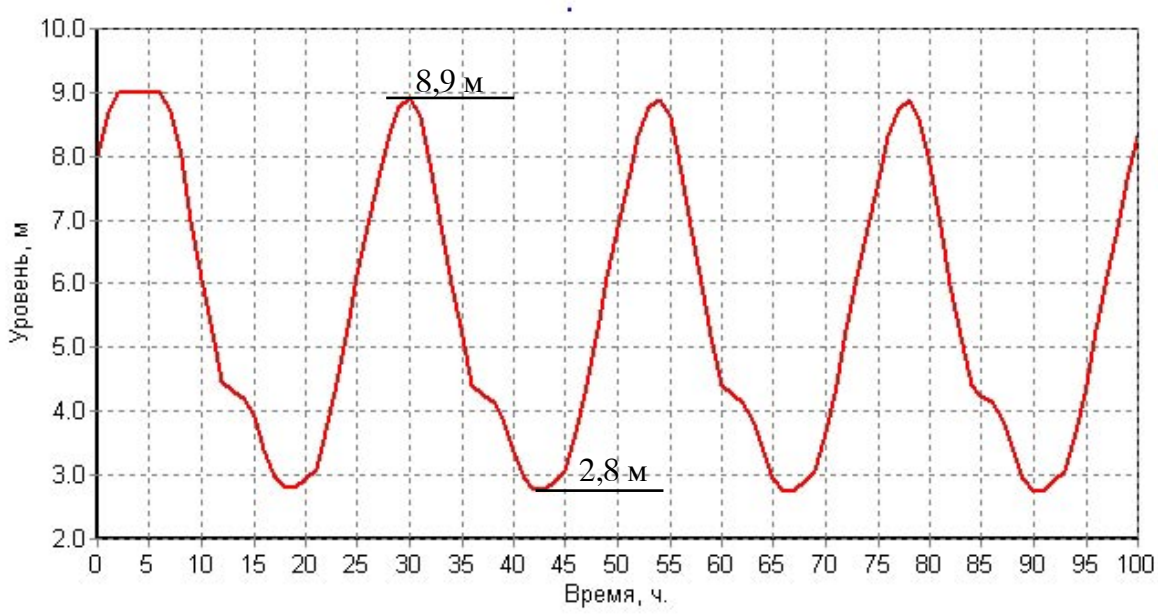


Рис. 28. Изменение уровня воды в накопителе при $H_Б$ = 104 м

Минимальный объем воды в водонапорной башне определяется заданной величиной противопожарного запаса. Допустим, что в данном примере его величина

составляет 100 м^3. При диаметре накопителя 11,3 м этому объему как раз и соответствует принятое ранее значение H_{min}. Поскольку имеется запас 2,8 – 1 = 1,8 м, можно уменьшить высоту H_{max} по меньшей мере на 1,5 м, но увеличить высоту $H_Б$ на ту же величину за счет увеличения высоты столба $H_Б$ (см. рис. 25). Расчет, выполненный при $H_Б$ = 105,5 и H_{max} = 7,5 м позволяет убедиться, что накопитель работает в том же режиме. Общий объем накопителя составляет в этом случае 750 м^3, что существенно меньше принятого в начале проектирования.

Действуя по изложенной методике можно рассмотреть и другие конструкции накопителя с целью выбора наиболее выгодного решения с точки зрения объема строительных работ и затрат.

Заключение

Приведенный пример иллюстрирует решение основных расчетных задач, возникающих при проектировании сетей водоснабжения, с использованием приложения для моделирования их работы. Некоторые задачи (например, проверка работы сети при отборе воды на пожаротушение, изменение уровня воды в источнике и т. п.) могут быть решены по аналогии.

В то же время приложение для моделирования сети позволяет прогнозировать ее работу в условиях, отличающихся от первоначально заложенных в проект: изменение объемов или графиков потребления воды через несколько лет, при изменении свойств (материала) трубопроводов и т. д.

Некоторые приложения, кроме гидравлических расчетов, позволяют оценить изменение качества воды при ее нахождении в сети: изменение концентрации какого-либо вещества, включая случаи водоснабжения из нескольких источников, рассчитать время пребывания воды в сети («возраст» воды или гидравлическое время).

Таким образом, используя то или иное приложение для моделирования работы сетей водоснабжения, инженеры могут не только сократить время проектирования, но и улучшить его качество за счет рассмотрения альтернативных вариантов проекта.

Приложение

Таблица П1

Коэффициенты k_i для хозяйственно-питьевого водопотребления

Час суток	Коэффициент суточной неравномерности $K_ч$ по [3]											
	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1
0 –1	0,84	0,80	0,77	0,72	0,6	0,48	0,36	0,24	0,22	0,20	0,18	0,14
1 – 2	0,83	0,78	0,78	0,77	0,64	0,50	0,36	0,24	0,22	0,20	0,18	0,14
2 – 3	0,83	0,79	0,70	0,60	0,53	0,44	0,36	0,24	0,22	0,20	0,24	0,29
3 – 4	0,82	0,77	0,70	0,62	0,54	0,46	0,36	0,24	0,24	0,24	0,24	0,48
4 – 5	0,82	0,78	0,804	0,84	0,768	0,68	0,6	0,48	0,324	0,648	0,72	0,84
5 – 6	0,85	0,82	0,90	0,98	0,94	0,89	0,84	0,72	0,92	1,13	1,32	0,84
6 –7	0,96	0,92	1,00	1,08	1,08	1,08	1,08	1,2	1,25	1,28	1,32	1,08
7 – 8	1,06	1,07	1,12	1,18	1,22	1,27	1,32	1,56	1,49	1,40	1,32	2,45
8 – 9	1,20	1,25	1,21	1,18	1,28	1,39	1,50	1,56	1,32	1,08	0,84	2,11
9–10	1,15	1,21	1,30	1,34	1,40	1,45	1,50	1,32	1,40	1,01	0,84	1,56
10–11	1,13	1,16	1,16	1,18	1,28	1,39	1,50	1,08	1,20	1,32	1,44	0,98
11–12	1,09	1,10	1,10	1,13	1,26	1,37	1,50	1,32	1,56	1,8	2,04	0,98
12–13	1,09	1,10	1,08	1,06	1,10	1,15	1,20	1,68	1,80	1,90	2,04	0,84
13–14	1,07	1,09	1,03	0,98	1,06	1,13	1,20	1,68	1,61	1,52	1,44	0,84
14–15	1,10	1,14	1,06	0,98	1,10	1,21	1,32	1,32	1,28	1,28	1,20	1,13
15–16	1,10	1,13	1,09	1,06	1,10	1,27	1,44	1,08	1,12	1,15	1,20	1,50
16–17	1,10	1,12	1,08	1,03	1,18	1,31	1,44	1,20	1,08	0,96	0,84	2,50
17–18	1,03	1,04	1,02	0,98	1,10	1,21	1,32	1,56	1,32	1,08	0,84	2,26
18–19	1,04	1,06	1,07	1,08	1,13	1,16	1,20	1,56	1,51	1,49	1,44	1,75
19–20	1,02	1,03	1,06	1,08	1,08	1,08	1,08	1,2	1,28	1,37	1,44	0,38
20–21	1,02	1,03	1,06	1,08	1,06	1,01	0,96	1,08	1,20	1,32	1,44	0,38
21–22	1,00	1,01	1,08	1,15	1,01	0,86	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,24
22–23	0,94	0,90	1,01	1,10	0,89	0,68	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,14
23–24	0,91	0,89	0,84	0,79	0,65	0,50	0,36	0,24	0,24	0,24	0,24	0,14

Таблица П2

Коэффициенты k_i для некоторых видов потребителей

Час суток	Больницы, гостиницы	Интернаты, общежития	Бани	Прачечные	Столовые	Детские сады
0 –1	0,05	0,04				
1 – 2	0,05	0,04				
2 – 3	0,05	0,04				
3 – 4	0,05	0,04				
4 – 5	0,12	0,04				
5 – 6	0,12	0,06				
6 –7	0,72	0,72			2,88	1,2
7 – 8	1,2	7,2			0,72	0,72
8 – 9	1,92	1,63			0,24	3,6
9–10	2,4	1,10		1	4,32	1,32
10–11	1,44	0,86		1	4,32	0,82
11–12	2,4	0,48	1	1	0,48	1,78
12–13	2,4	0,72	1	1	0,24	5,04
13–14	1,44	0,72	1	1	0,24	0,67
14–15	1,2	0,72	1	1	0,96	0,58
15–16	2,04	0,72	1	1	0,96	1,08
16–17	1,32	0,96	1	1	0,96	0,96
17–18	1,2	0,86	1	1	1,44	3,84
18–19	1,2	0,79	1	1	0,72	0,72
19–20	1,2	1,2	1	1	1,44	0,48
20–21	0,48	0,62	1		1,68	0,48
21–22	0,17	4,46	1		2,4	0,72
22–23	0,72	0,38				
23–24	0,12	0,24				

Таблица П3

Длины трубопроводов

Обозначение трубопровода	Длина, м	Диаметр, мм	Обозначение трубопровода	Длина, м	Диаметр, мм
5 – 6	610	200	2 – 6	425	100
6 – 7	510	150	2 – 10	540	100
7 – 8	440	100	3 – 7	425	100
4 – 8	420	100	3 – 11	540	150
3 – 4	440	100	4 – 12	530	150
2 – 3	510	100	Р3	1000	300
1 – 2	620	150	Р4	1000	300
1 – 9	550	270	Р5	1000	300
9 – 10	630	280	Р6	1000	300
10 – 11	515	250	Фиктивные участки		
11 – 12	430	200	Ф1	1	400
1 – 5	425	200	Ф2	0,1	1000

Примечание. Диаметры трубопроводов определены в результате расчета (п. 5)

Таблица П4

Высотные отметки узлов сети

Обозначение узла	Высотная отметка, м	Обозначение узла	Высотная отметка, м
1	83,2	9	80,3
2	81,8	10	80,3
3	80,6	11	79,6
4	79,1	12	78,3
5	81,4	13	80,3
6	80,8	14	80,3
7	80,1	15	80,3
8	78,2	R1	80

Библиографический список

1. EPANET 2.2 User Manual. Электронный ресурс: https://epanet-users-manual.readthedocs.io/_/downloads/en/latest/pdf/ (дата доступа 12.10.2024)

2. Абрамов Н. Н. Водоснабжение: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / Н. Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с

3. СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* с изменением № 1. — М. : ФАУ «ФЦС», 2015. – 135 с. Электронный ресурс: http://sk5-410-lib-te.at.urfu.ru/docs/ (дата обращения: 01.10.2022).

4. Медиоланская М. М., Мезенева Е. А., Колобова С. В. Проектирование водопроводных сетей: Учеб. пособие / М. М. Медиоланская, Е. А. Мезенева, С. В. Колобова. – Вологда: ВТУ, 1999. – 150 с.

Текстовый электронный образовательный ресурс

Некрасов Александр Васильевич

Использование моделирования при проектировании распределительных сетей водоснабжения

Методические указания

Компьютерная верстка *А. В. Некрасова*

Рекомендовано Методическим советом УрФУ

Протокол №__ от _____2025

Электронный формат – pdf

https://study.urfu.ru