

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Рассматриваются комплекс проблем, возникающих при расчете потокораспределений трубопроводных сетей, различные классические модели отдельных элементов трубопроводов, их достоинства и недостатки, а также предлагаются новые модели, способные более точно описывать гидродинамику реальных объектов. Описывается реализация универсального алгоритма моделирования элементов трубопроводов и его применение в системе гидравлических расчетов.

Введение

При решении ряда практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией трубопроводных инженерных сетей, часто возникает задача расчета и анализа установившихся гидравлических режимов (потокораспределения) [1]. На практике наиболее широко получила распространение математическая модель установившегося потокораспределения. В ее основе лежит моделирование сети в виде графа, ребрами которого являются последовательно соединенные элементы трубопроводов. Для расчета потокораспределения используется целый ряд различных методов [1-3]. В их основе лежит моделирование гидродинамического сопротивления отдельных элементов трубопроводов.

Классические методы моделирования сопротивления элементов трубопроводов используют эмпирические зависимости потери напора от расхода. Как правило, это степенные зависимости (для труб) или биномиальные (для насосных агрегатов). Зачастую такие модели являются очень грубыми, что может приводить не только к неверным результатам, но и к расхождению итерационного процесса расчета.

В настоящий момент современная вычислительная техника позволяет проводить более точное моделирование элементов трубопроводов.

Предлагаемые в настоящей работе модели дают возможность более точно учитывать типовые параметры оборудования, а также такие параметры, как степень открытия задвижек, температура жидкости. Предлагается индивидуально учитывать параметры элементов, а в случае отсутствия данных – подставлять типовые. Основной используемый метод моделирования – это построение полиномиальных зависимостей потери напора от расхода по наборам измерений (для итерационных процессов, основанных на вычислении производных) или построение кусочно-линейных зависимостей для других методов.

1. Моделирование сети

Модель установившегося потокораспределения базируется на следующих предположениях:

1) Сеть представляет собой систему, состоящую из большого числа подсистем трех типов: нагрузок или потребителей, активных источников и линий связи.

2) Каждая такая i -я подсистема характеризуется двумя величинами: последовательной (расходом) q_i и параллельной (потерей напора) h_i , рядом дополнительных параметров, а также выбранным направлением. Потеря напора h_i представляет собой разность давлений, под которым находится газ или жидкость в начале и в конце i -го участка трубопровода.

3) В качестве потребителя в сети рассматривается эквивалентный участок, называемый фиктивным (стоком) и направленный от какого-либо узла сети к точке с нулевым давлением.

4) К источникам водо- и газоснабжения (активным элементам) следует отнести насосные и компрессорные станции.

5) Линии связи (пассивные элементы) представляют собой участки трубопровода. Сюда же относятся задвижки и прочая арматура, участвующая в передаче жидкости или газа.

Таким образом, структура инженерной сети представляет собой граф, отражающий характер связи между подсистемами сети. Общий поток жидкости или газа, подаваемый в сеть источниками, равен суммарному расходу потребителей сети. В сети имеют место законы Кирхгофа [2]:

- 1) Сумма расходов в любом узле сети равна нулю.
- 2) Сумма потерь напора по любому замкнутому циклу равна нулю.

Расчетная модель сети представляет собой граф, ребрами которого являются подсистемы, состоящие из последовательно соединенных активных либо пассивных элементов; подсистемы соединяются в узлах графа (графовая модель). На рис. 1,а приведен пример схемы реальной сети, а на рис. 1,б – ее графовая модель.

В настоящее время для расчета установившегося потокораспределения используется несколько методов. Среди прямых классических методов – это метод Ньютона, метод градиентного спуска для систем нелинейных уравнений [1]. Использование их накладывает определенные ограничения на модели элементов: уравнения, описывающие зависимость падения напора от расхода, должны быть дифференцируемы требуемое число раз. Среди непрямых методов следует отметить метод поиска точек схода, метод Лобачева–Кросса, двухэтапный метод расчета потокораспределения. Двухэтапный метод находит все большее применение вследствие его хорошей сходимости, простоты и отсутствия ограничений на модели элементов сети [5].

2. Моделирование элементов трубопроводов

Течение жидкости по трубопроводам сопровождается потерями ее энергии на преодоление сил трения, возникающих при соприкосновении движущейся жидкости с внутренней поверхностью труб. Кроме того, дополнительные потери энергии возникают в местах резкого изменения направления или площади сечения потока жидкости, при ее

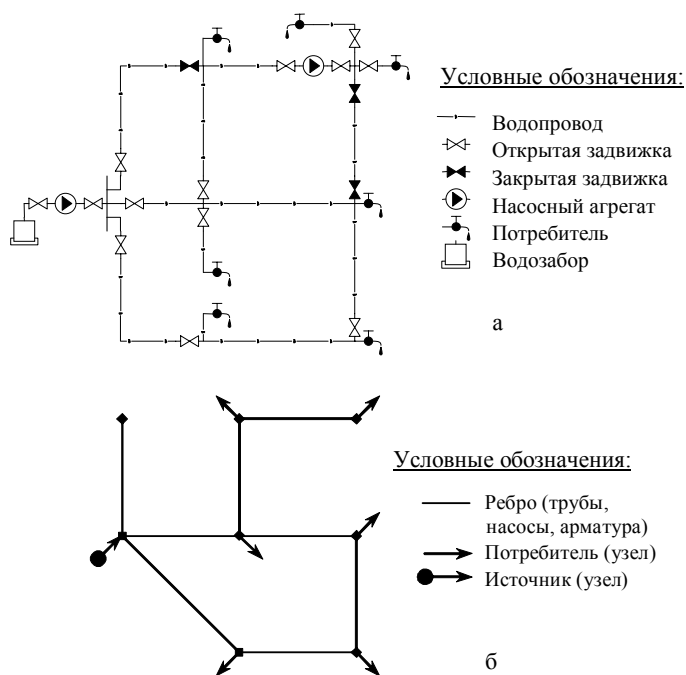


Рис. 1. Водопроводная сеть и ее графовая модель

прохождении через арматуру, а также при разделении потока на несколько потоков или их объединении в единый поток.

Основным уравнением, используемым для расчета потокораспределения, является зависимость потери напора (параллельной переменной) от расхода через элемент сети (последовательной переменной) $h(q)$. Такая зависимость должна быть определена для всех ветвей графа. Для i -й ветви зависимость $h_i(q_i)$ определяется параметрами элементов этой ветви:

$$h_i = \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}(q_i), (i = \overline{1, N}),$$

где $h_{ij}(q_i)$ – параллельные переменные j -го элемента i -й ветви (следует отметить, что у активных элементов $h_{ij}(q_i) < 0$, что означает, что напор в элементе не падает, а увеличивается); n_i – число элементов ветви; N – число ветвей.

В настоящее время на практике зависимости для пассивных элементов аппроксимируют формулой вида

$$h_{ij}^{nac.} = \operatorname{sgn} q_{ij} r_{ij} |q_i|^{k_{ij}},$$

где $r_{ij} > 0$ – сопротивление j -го элемента; $k_{ij} \geq 1$ – коэффициент нелинейности j -го элемента. Эти параметры определяются экспериментально и на основе эмпирических формул. В табл. 1 представлены некоторые из них, а также значения гидродинамического сопротивления S . Как видно, в ряде предлагаемых формул сопротивление является переменным, зависящим от расхода.

Таблица 1

Эмпирические формулы зависимости потери напора от расхода

Формула	Зависимость h от q	Зависимость S от q
Шевелева, для старых стальных и чугунных водопроводных труб при $v < 1,2$ м/с	$h = 0,001736 \frac{l}{d^{5,3}} q q $	$S = 0,001736 \frac{l}{d^{5,3}}$
–/– при $v < 3$ м/с	$h = 0,00148 \frac{l}{d^{5,3}} \left(1 + \frac{0,688d^2}{q}\right)^{0,3} q q $	$S = 0,00148 \frac{l}{d^{5,3}} \left(1 + \frac{0,688d^2}{q}\right)^{0,3}$
Шевелева, для асбоцементных водопроводных труб	$h = 0,0091 \frac{l}{d^{5,19}} \left(1 + \frac{2,78d^2}{q}\right)^{0,19} q q $	$S = 0,0091 \frac{l}{d^{5,19}} \left(1 + \frac{2,78d^2}{q}\right)^{0,19}$
Шевелева, для пластмассовых водопроводных труб	$h = 0,001052 \frac{l}{d^{4,774}} \operatorname{sgn} q q ^{1,774}$	$S = 0,001052 \frac{l}{d^{4,774}}$
Для газовых труб низкого давления	$h = 2,32 \frac{l}{d^{4,75}} \operatorname{sgn} q q ^{1,75}$	$S = 2,32 \frac{l}{d^{4,75}}$
Дарси-Вейсбаха	$h = 16 \frac{\lambda l}{2g\pi^2 d^5} \operatorname{sgn} q q ^2$	$S = 16 \frac{\lambda l}{2g\pi^2 d^5}$

Как видно, формулы достаточно громоздки, и в зависимости от разных типов труб и скоростей зависимость сильно меняется. В универсальном уравнении Дарси-Вейсбаха ис-

пользуется эмпирический коэффициент λ . На практике же зависимости каждой конкретной трубы могут не совпадать с типовыми. Это происходит из-за коррозии, изменения характеристик стенок, «зарастания» труб и т.п. Кроме того, данные формулы справедливы лишь для некоторого диапазона расходов. При возрастании расхода данные зависимости перестают выполняться. Кроме того, представляется необходимым индивидуальное задание параметров труб.

Очень важным является моделирование арматуры и прочих специфических участков трубопроводов, таких, как отводы, переходы, компенсаторы. Их называют местными сопротивлениями, и для описания зависимости падения напора от расхода используется следующая формула:

$$h_{м.с} = \zeta \frac{v^2}{2} \rho,$$

где $h_{м.с}$ – потери давления в местном сопротивлении, ζ – коэффициент местного сопротивления, v – скорость движения среды, ρ – удельная масса среды. Для различных видов арматуры составлены таблицы коэффициентов местных сопротивлений. В табл. 2 приведены некоторые значения коэффициентов местных сопротивлений, используемые при расчетах потери напора.

Таблица 2

Значения коэффициента местного сопротивления

Местное сопротивление	Коэффициент ζ
Задвижка нормальная	0,5
Вентиль с вертикальным шпинделем	6
Кран проходной	2
Компенсатор П-образный со сварными отводами	2,8
Отвод сварной одношовный под углом 60°	0,7
Грязевик	10
Тройник при разделении потока, ответвление	1,5

Очевидно, что такие таблицы лишь приблизительно отражают характер сопротивления и не учитывают ни условный проход местного сопротивления, ни степень его износа, ни геометрические характеристики.

Зачастую, хотя это и запрещено условиями эксплуатации, производится неполное перекрытие запорной арматуры. В этом случае арматура начинает играть роль редукторов давления. Например, при перекрытии задвижки наполовину можно понизить давление потребителя, доведя его до допустимого. В силу широкого распространения данного факта требуется моделировать и такую «полузакрытую» арматуру. В литературе предлагается изменять коэффициент ζ для каждого положения задвижки [6].

Параллельная переменная j -го активного элемента i -й ветви определяется нагрузочной характеристикой этого элемента и обычно аппроксимируется в заданной рабочей области $q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}$ полиномом второй степени следующего вида:

$$h_{ij}^{акм.}(q_i) = -(\psi_{0ij} + \psi_{1ij}q_i + \psi_{2ij}q_i^2),$$

где $h_{ij}^{(актив.)}$ – постоянная или монотонно убывающая в области $q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}$ функция. Однако следует отметить, что насосные агрегаты (активные элементы) часто эксплуати-

руются вне рабочей области q , и их реальные нагрузочные характеристики недостаточно точно описываются полиномом второй степени (рис. 2).

Все вышесказанное приводит к необходимости более тщательного моделирования элементов трубопроводов. Предлагаемый способ моделирования является универсальным для всех видов элементов сетей (активных и пассивных) и может учитывать некоторые дополнительные параметры элементов, такие, как пропускной коэффициент (для регуляторов давления, редукторов, запорной арматуры) и температуру жидкой среды.

Универсальная зависимость для пассивных и активных элементов трубопроводов будет описываться плавной кривой, построенной по набору точек. Это будут точки трехмерного пространства с координатами (расход, температура, падение напора). Для арматуры, имеющей переменный пропускной коэффициент, это будут точки вида (расход, температура, пропускной коэффициент, падение напора). Аппроксимирующая функция будет иметь вид

$$h_{ij}(q_i, t, \lambda_{ij}) = A_{ij}(q_i, t, \lambda_{ij}),$$

где q_i – расход i -й ветви; t – температура среды; λ_{ij} – пропускной коэффициент (для запорной арматуры и регуляторов $0 \leq \lambda_{ij} \leq 1$, для остальных =1); A_{ij} – аппроксимированное значение падения напора в точке (q_i, t, λ_{ij}) .

Для построения однозначной аппроксимирующей поверхности по набору этих точек можно использовать различные методы, например кусочно-линейную, гладкую полиномиальную или сплайновую аппроксимацию. На рис. 3 изображен набор точек, описывающих зависимость падения напора от расхода и температуры. Как правило, данные точки снимаются при варьировании одного параметра, например расхода, при неизменных остальных. Это позволяет использовать следующую схему расчета $A_{ij}(q_i, t, \lambda_{ij})$ для произвольной точки.

Рассмотрим случай, когда $\lambda_{ij} = 1$ (простая труба) и t – постоянная. Пусть у нас имеется набор точек $q_i, i = \overline{1, N}$, где $q_i < q_{i+1}$ и $q_i < h(q_i)$. Для вычисления $h(q)$, где $q_1 \leq q \leq q_N$, можно воспользоваться различными интерполяционными методами, выбор которого зависит от требуемого качества аппроксимации и необходимой скорости расчета.

В силу того, что методы гидравлического расчета по преимуществу являются

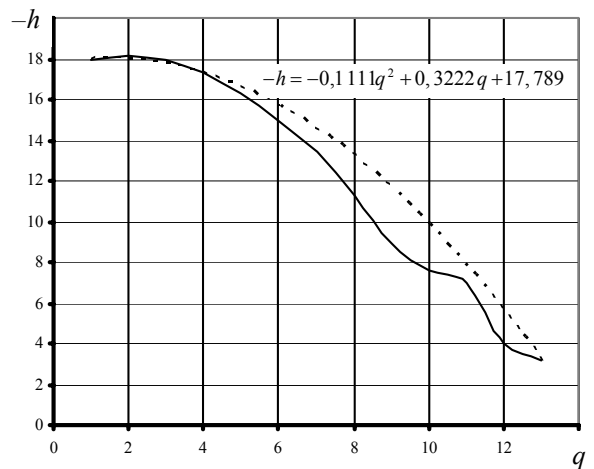


Рис. 2. Нагрузочная характеристика насосного агрегата и ее аппроксимация

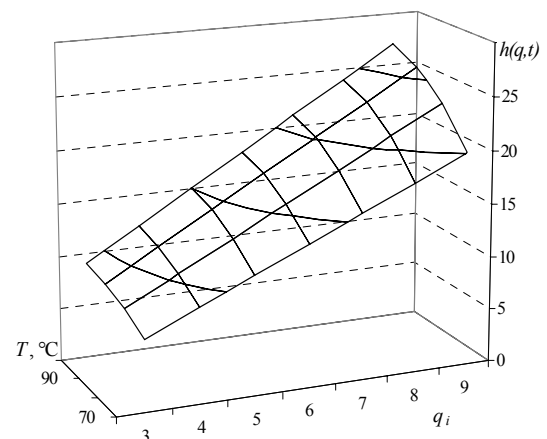


Рис. 3. Зависимость $h(q, t)$ для трубы

итерационными, предлагается следующая схема расчета локальных $h(q)$. На первых итерациях (локализация решения) используется грубая аппроксимация (например, кусочно-линейная), а для получения точного решения – сплайновая или полиномиальная аппроксимация.

Пусть для нескольких значений температуры $t_j, j = \overline{1, M}$, заданы наборы точек $q_i, i = \overline{1, N}$, и значения $h(q_{ij})$. Для всех M заданных значений вычислим (при помощи одного из перечисленных выше методов) набор значений $h_j(q)$. Имея эти значения, можно рассчитать $h(q, t)$, используя их как исходные точки для стандартных интерполяционных методов.

Аналогично можно рассчитать $h(q, t, \lambda)$. Для нескольких значений $\lambda_k, k = \overline{1, P}$ задаются наборы значений температуры, для которых, в свою очередь, задаются значения расхода и соответствующие им значения $h(q_{ijk})$. Затем для всех $P \times M$ заданных значений температуры и пропускного коэффициента вычислим набор значений $h_{jk}(q)$. Имея их, рассчитаем $h_k(q, t)$ для всех P значений λ , затем вычислим $h(q, t, \lambda)$.

3. Система моделирования

Определим понятие *класса подсистем* как все однотипные элементы трубопроводов, имеющие одну марку, материал изготовления, т.е. такие, напорные характеристики которых априорно совпадают. Для всех подсистем трубопроводной сети задаются их основные характеристики, требуемые для классического расчета: длина и диаметр труб, их материал, коэффициенты местных сопротивлений, напорные характеристики насосов. Затем, в случае появления уточняющих данных, для классов подсистем строятся универсальные зависимости. Если имеются конкретные данные для отдельных экземпляров элементов трубопроводов, то по ним строятся индивидуальные зависимости.

При моделировании происходит следующее. Для очередного элемента, вовлекаемого в расчет, определяется, откуда будет браться его уравнение зависимости $h(q)$. Если имеется индивидуальная зависимость, то она используется, в противном случае берется зависимость, определенная для данного класса подсистем. Если и эти данные отсутствуют, то берется стандартная формула, используемая в классических методах.

Такая система моделирования была реализована на практике в программе расчетов гидравлических режимов водопроводных сетей, созданной в НПО «Сибгеоинформатика» для геоинформационной системы ГрафИн 4.0. Для моделирования сети пользователю предоставляется большой набор стандартных элементов сети: трубопроводы, запорные арматуры, насосные агрегаты, редукторы, компенсаторы, тройники, крестовины, коллекторы, клапаны, переходы, фильтры, гасители ударов. Кроме того, имеются потребители, для которых задаются требуемые объемы потребления и напоры, и источники, для которых задаются дебиты и базовый напор. На рис. 4 приведен пример графического изображения участка водопроводной сети в геоинформационной системе ГрафИн.

После создания изображения сети происходит наполнение данными. Для труб задаются длина, диаметр, материал, либо задается индивидуальная кривая падения напора; кроме того, задаются номинальное и максимальное давление (используется для проверки физической реализуемости процесса). Для насосных агрегатов задается их марка (по спра-

вочнику), для арматуры можно задать индивидуальные коэффициенты местных сопротивлений либо кривую падения напора. Справочник насосных агрегатов содержит информацию о напорной характеристике данного типа насосов, максимально допустимых давлениях, мощностях. Для запорной арматуры имеется возможность задавать либо признак «открыта/закрыта», либо процент открытия. Информация хранится в базе данных, записи которой соответствуют графическим изображениям элементов трубопровода. Кроме того, имеется возможность задания высотных отметок в узлах сети или в произвольных точках.

После ввода всех параметров производится гидравлический расчет. Его результаты выводятся в табличной форме (давления в узлах сети, расходы и потери напора в ребрах) и в виде подписей на графическом изображении.

Для проверки точности результатов было проведено экспериментальное моделирование работы разработанных алгоритмов. Производились сравнения универсальной модели элементов, классических моделей и реальных данных для реальных участков водопроводной сети. Фрагменты результатов расчетов давлений в узлах приведены в табл. 3, а потоков по ребрам – в табл. 4.

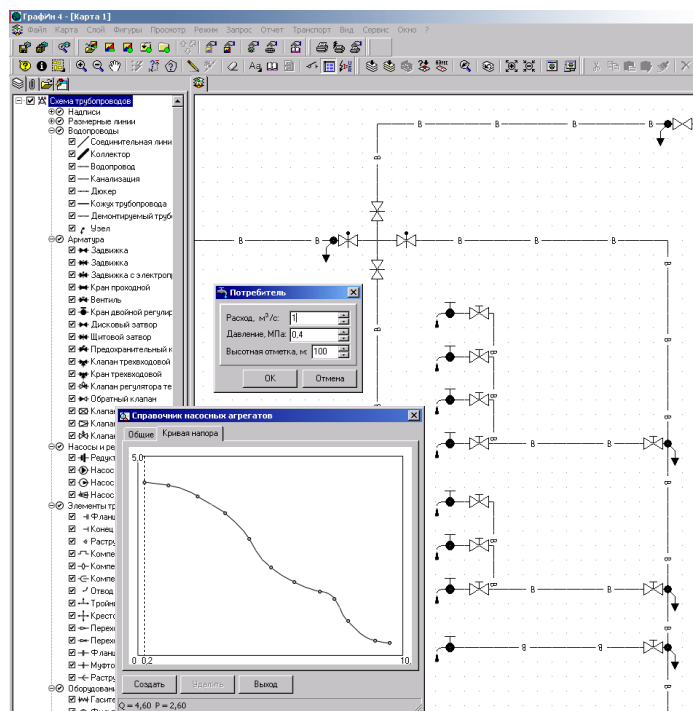


Рис. 4. Внешний вид схемы водопровода в ГИС Графин 4.0

Таблица 3

Расчет давления в узлах графа водопроводной сети

Узел	Давление в узле, атм.		
	Реальные данные	Предлагаемая модель элементов	Классические модели элементов
Источник	5	5	5
1	7,02	7,022	7,154
2	6,56	6,550	6,706
3	8,77	8,722	8,981
4	6,45	6,405	6,665
5	7,08	7,080	7,153
6	6,29	6,288	6,534
7	4,83	4,828	5,030
8	6,33	6,323	6,349
9	7,34	7,350	7,019
10	7,25	7,263	6,892

Таблица 4

Расчет потоков в ребрах графа водопроводной сети

Ребро	Поток в ребре, м ³ /с		
	Реальные данные	Предлагаемая модель элементов	Классические модели элементов
1	0,94	0,935	0,984
2	0,94	2,935	2,984
3	2	2	2
4	4,94	4,935	4,984
5	1,06	1,065	1,016
6	5	5	5
7	7	7	7
8	12	12	12
9	2	2	2
10	15,04	15,04	15,016
11	0	0	0

Как видно из таблиц, предлагаемый род индивидуального универсального моделирования несколько повышает точность расчетов. На рассмотренной водопроводной сети отклонение решения по давлению не превысило 1%, тогда как при применении классического моделирования отклонение превышало 3%. При расчете потоков картина аналогична, т.к. этот расчет базируется на данных о перепаде давлений. При этом наибольшие отклонения возникают в циклических участках сети.

В заключение отметим, что предложенный в работе подход позволяет не только поднять точность результатов расчетов по сравнению с классическими методами, но и повысить скорость сходимости итерационного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов А.Г., Дубровский В.В., Тевяшев А.Д. Потокораспределение в инженерных сетях. – М.: Стройиздат, 1979. – 199 с.
2. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Дубровский В.В. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. – М.: Стройиздат, 1990. – 368 с.
3. Бутковский А.Г. // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – Т. 269. – № 3. – 1983. – С. 112-122.
4. Прозоров И.В., Николадзе Г.И., Минаев А.В. Гидравлика, водоснабжение и канализация. – М.: Высшая школа, 1990. – 448 с.
5. Слюсаренко С.Г. // Процессы и режимы электрических систем. Межвузовский сборник – Томск: Изд-во ТПИ, 1990. – С. 37-44.
6. Беляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. и др. Водяные тепловые сети. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.