На правах рукописи

МЫЗНИКОВ
Алексей Михайлович

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук,
профессор Файзуллин Р.Т.

Тюмень – 2005

Работа выполнена на кафедре “Информационная безопасность” в ГОУ ВПО Омском государственном университете

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Файзуллин Р.Т.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Моделирование гидравлических сетей, является важной задачей в процессе наладки сложных трубопроводов, а также при управлении существующими гидравлическими системами. Модели, описывающие такие сети с большим количеством участков, представляют собой системы нелинейных уравнений большой размерности. В силу возрастающей сложности реальных объектов и постепенного перехода от задач технологического проектирования к задачам эффективного управления гидравлическими сетями, постоянно требуется совершенствование старых и разработка новых методов их моделирования и расчета.

Трубопроводные системы - это сложные динамические системы, характеристики которых во время работы постоянно меняются по заранее неизвестному закону. Значения коэффициентов сопротивления участков, из-за дефектов строительства или отклонений в процессе эксплуатации, существенно отличаются от проектных данных. Следствие этого, неправильное их задание в уравнениях для решения прямой задачи распределения потоков, что вместе с неточным знанием нагрузок приводит к большим погрешностям в рассчитываемом потокораспределении. Поэтому, возникает необходимость в решении обратных задач, в частности, задачи уточнения коэффициентов сопротивления участков трубопроводных сетей.

Еще более актуальной данная задача становится в рамках перехода от задач проектирования трубопроводных систем к задачам эффективного управления, поскольку огромное количество гидравлических сетей уже построено и эксплуатируется. При этом на первый план выходят более сложные задачи эффективного управления существующими трубопроводными сетями.

Цель исследования. Основной задачей исследования является разработка эффективных алгоритмов и методов расчета больших трубопроводных систем, позволяющих решать задачи проектирования и управления большими гидравлическими сетями, а также решение обратных задач идентификации объектов, позволяющих повысить адекватность математической модели.

Задачи исследования:

Получить алгоритм, позволяющий эффективно решать большие системы нелинейных уравнений в задачах гидравлического расчета трубопроводных систем.

Разработать подходы и методы, позволяющие уточнять модели гидравлических сетей для повышения точности расчетов.

Разработать эффективные методы управления гидравлическими сетями, позволяющие в конечном итоге повысить качество услуг, а также повысить экономичность систем.

Научная новизна. В процессе исследований и разработки теоретических и прикладных приложений получены следующие научные результаты.

1. Предложена модификация метода последовательных приближений, позволившая значительно уменьшить количество итераций метода, обеспечить более высокую точность вычислений. Метод был адаптирован для решения задачи определения распределения потоков для произвольного закона гидравлического сопротивления. Доказана единственность определения потокораспределения для произвольного закона гидравлического сопротивления при использовании модулей в нелинейных уравнениях.

2. Рассмотрена задача уточнения коэффициентов сопротивления при наличии ограниченного количества датчиков. Предложен метод решения задачи в общем случае, когда в сети одновременно имеются датчики давления и расхода.

3. Разработан метод вычисления функции последовательного изменения активных сопротивлений для обеспечения плавного перехода между режимами работы гидравлической сети.

Практическая значимость работы:

- разработанный алгоритм определения потокораспределения позволил решать задачи моделирования и управления большими гидравлическими сетями (20 тыс. участков и более) в режиме реального времени, при этом от пользователя не требуется знания специфики используемых методов и определения начальных приближений;

- применение методов идентификации гидравлических сетей позволило повысить точность моделирования нефтепроводных сетей;

- внедрение предложенного метода регулирования потокораспределения в тепловых сетях позволит обеспечить более качественное управление отпуском тепла потребителям, без затратного изменения режимов работы ТЭЦ.

Внедрение результатов исследований. Разработанные методы и алгоритмы реализованы в программном комплексе расчета тепловых сетей внедряемом для расчета тепловых сетей Новосибирского академического городка в рамках проекта “Энергосбережение СОРАН”.

Публикации по теме диссертации: Основные результаты диссертации опубликованы в шести печатных работах. Результаты докладывались на 36-й Региональной конференции “Проблемы теоретической и прикладной математики” (Екатеринбург,УрО РАН), на XLIII международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”(Новосибирск), на семинаре в институте гидродинамики им. Лаврентьева (Новосибирск), на семинаре «Физическая гидродинамика» института теплофизики им. Кутателадзе (Новосибирск).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Модификация метода последовательных приближений для расчета потокораспределения в сложных гидравлических сетях с большим количеством участков.

2. Общая постановка задачи идентификации гидравлических сетей путем уточнения коэффициентов сопротивления участков и методы ее решения.

3. Метод регулирования отпуска тепла потребителям и обеспечения заданных расходов на участках при помощи изменения распределения потоков.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 116 страниц. Библиографический список насчитывает 76 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, проведен обзор существующих на данный момент методов решения, освещены основные достигнутые результаты.

В первой главе производится постановка задачи определения установившегося распределения потоков в гидравлических сетях и предлагается эффективный метод ее решения.

Система уравнений, получаемая для модели определения неизвестных значений установившихся расходов по трубам в случае произвольного закона гидравлического сопротивления, может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned}
&c_{11}x_1 + ... + c_{1n}x_n = q_1,\\
&...\\
&c_{k1}x_1 + ... + c_{kn}x_n = q_k,\\
&c_{k+11}s_1 \,|\, x_1 \,|^{\beta_1 - 1}\, x_1 + ... + c_{k+1n}s_n \,|\, x_n \,|^{\beta_n - 1}\, x_n = h_1,\\
&...\\
&c_{n1}s_1 \,|\, x_1 \,|^{\beta_1 - 1}\, x_1 + ... + c_{nn}s_n \,|\, x_n \,|^{\beta_n - 1}\, x_n = h_{n-k},
\end{aligned} \tag{1}$$

где x_i - расход по i-ой трубе; коэффициент $c_{ij} = 1, -1, 0$ определяется по первому или второму закону Кирхгофа. Для первого закона Кирхгофа втекающий в контрольную точку поток привносит коэффициент, равный единице; вытекающему потоку отвечает коэффициент, равный минус единице. Для второго закона Кирхгофа и для нелинейных уравнений c_{ij} равен +1,-1(в зависимости от направления обхода), если *j*-й участок входит в цикл, соответствующий *i*-му нелинейному уравнению, либо $c_{ij} = 0$. h_i - сумма действующих напоров с учетом знака по всем дугам *i*-го контура. q_i- приток(отбор) в узле, β_j- степень в законе зависимости величины падения напора от значения расхода.

Коэффициенты линейных уравнения системы (1) представляют собой матрицу A соединений графа гидравлической сети. Тогда линейные уравнения системы (1) в векторном виде выглядят следующим образом:

$$Ax = Q. \tag{2}$$

Вводя матрицу контуров *B*, получим компактную запись второго закона Кирхгофа для всей схемы:

$$BSXx = H, \tag{3}$$

где

$$S = \begin{bmatrix} s_1 & & & 0 \\ & \cdot & & \\ & & \cdot & \\ 0 & & & s_n \end{bmatrix} \text{ и } X = \begin{bmatrix} |x_1|^{\beta_1 - 1} & & & 0 \\ & \cdot & & \\ & & \cdot & \\ 0 & & & |x_n|^{\beta_n - 1} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Введем обозначение для общей матрицы системы нелинейных уравнений

$$F(X) = \begin{bmatrix} A \\ BSX \end{bmatrix},\ G = \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix}, \tag{5}$$

тогда система уравнений (1) в векторном виде

$$F(X)x = G. \tag{6}$$

При условии, что система (1) составлена в соответствии с законами Кирхгофа для гидравлической сети, имеет место следующая теорема.

Теорема: *Пусть x – вектор решения системы нелинейных уравнений (1), составленной для задачи определения расходов, такой, что каждая компонента* x_i *не равна нулю, F(x) – матрица системы уравнений, тогда он единственный вектор решения задачи F(x)x=G.*

Для решения данной системы уравнений предлагается модифицированный метод, построенный на основе метода последовательных приближений предложенного Р.Т. Файзуллиным совместно с К.В. Логиновым.

Решение задачи ищется как предел итераций вида:

$$x^{(i+\frac{1}{2})} = \alpha x^{(i)} + (1-\alpha) x^{(i-\frac{1}{2})} \tag{7}$$

$$F(x^{(i+\frac{1}{2})}) x^{(i+1)} = G,$$

где F - матрица системы уравнений (6), $x^{(i)}, x^{(i+1)}$ - приближенные решения на i и $i+1$ шаге соответственно, $x^{(i-\frac{1}{2})}, x^{(i+\frac{1}{2})}$ - промежуточные решения, $\alpha \in (0{,}1)$. Например, в случае квадратичного закона гидравлического сопротивления $\alpha = 0.5$.

Данный метод представляет собой метод простой итерации, на каждой итерации которого происходит усреднение приближений до и после итерации. Необходимость усреднения приближений вызвана тем, что метод простой итерации не обладает сходимостью, на определенной итерации приближения осциллируют по нескольким областям.

Достоинствами данного метода является широкая область сходимости. Также, скорость сходимости близка к квадратичной, что следует из следующего утверждения.

Утверждение: *Если для итерационного метода представленного формулой (7), степень нелинейности в законе гидравлического сопротивления равна* β *для каждого участка, параметр определения следующего итерационного приближения* $\alpha = \dfrac{1}{\beta}$*, и на каждой итерации невязка линейной части равна 0,* *то модифицированный метод последовательных приближений эквивалентен методу Ньютона.*

Этот факт позволяет утверждать, что метод сходится при условии наличия достаточно хорошего начального приближения. К сожалению, строгого доказательства сходимости в общем случае, без необходимости наличия хорошего приближения, не было получено. Доказательство осложняется тем, что оператор $F^{-1}(x)H$ не ограничен в общем случае. Однако, анализ задачи 2-й и 3-й размерности, для которых можно доказать сходимость модифицированного метода последовательных приближений при определенных условиях, а также многочисленные эксперименты и реальная эксплуатация данных методов, подтверждают, что сходимость имеется. Причем наличие хорошего начального приближения не требуется.

Построение линейно независимых циклов для второго уравнения Кирхгофа можно осуществить, при помощи построения остовного дерева графа гидравлической системы, с помощью алгоритма Краскала. На схеме выделяется некоторое дерево, связывающее все ее m узлов, в результате все участки разобьются на (m-1) участков дерева и k участков, не вошедших в дерево, которые называются хордами. Каждая хорда замыкает какую-то последовательность участков дерева и однозначно определяет контур, который фиксируется соответствующей строкой матрицы B.

Т.е. $x = (x_\partial, x_к)$, где $x_\partial = (x_1, ..., x_{m-1})$ - расходы на участках дерева, $x_к = (x_m, .., x_n)$ - расходы на хордах.

Для эффективной реализации модифицированного метода последовательных приближений полезен учет свойств матриц соединений и матриц контуров. Одним из таких свойств является свойство

$$B_\partial^T = -A_\partial^{-1} A_k, \tag{8}$$

где B_∂, A_∂ - блоки матриц B, A относящиеся к дугам дерева, B_k, A_k соответственно, блоки относящиеся к хордам.

В работе показывается, что обращение матрицы $F(x^{(i+\frac{1}{2})})$ на каждой итерации не требуется. С учетом (8), вычисление последующих приближений может быть представлено в виде

$$x^{N+\frac{1}{2}} = \alpha x^N + (1-\alpha)x^{N-\frac{1}{2}},$$

$$\begin{aligned} x_k^{N+1} &= K(x^{N+\frac{1}{2}})^{-1}(H - B_\partial S_\partial X_\partial^{N+\frac{1}{2}} A_\partial^{-1} Q), \\ x_\partial^{N+1} &= B_\partial^T x_k^{N+1} + A_\partial^{-1} Q. \end{aligned} \tag{9}$$

$K(x) = BSXB^T$ - симметрическая матрица размерности $k \times k$, где $k = (n - m + 1)$ – количество линейно независимых циклов в графе, n – количество дуг графа, m – количество узлов.

Начальное приближение можно выбрать, решив систему с $x_i^0 = 1$, что соответствует решению задачи определения потокораспределения для ламинарного режима течения жидкости. Кроме того, замена полученных x_i^1 на $sign(x_i^1)\sqrt{|x_i^1|}$ позволит еще несколько улучшить начальное приближение.

В результате численного эксперимента установлено:

1. модифицированный метод позволяет решать задачи определения неизвестных стационарных значений расходов по трубам, при этом не требуется задание начального приближения. Для получения заданной точности, требуется значительно меньшее количество итераций, чем у исходного метода последовательных приближений.
2. Метод сходится для степеней β вплоть до 10, но количество итераций для больших степеней резко возрастает.
3. Система уравнений является хорошо обусловленной, если хорошо обусловлена ее начальная матрица. Имеется устойчивость по правой части.
4. В случае модификации метода для расчета электрических сетей, в комплексном случае (тот же алгоритм, но с учетом комплексной арифметики, сопротивления и правые части уравнений – комплексные

числа, закон сопротивления $(a_j |x_j| + ib_j)x_j = U$), алгоритм по-прежнему обладает сходимостью. Оптимальное $\alpha \in (0.57 - 0.6)$.

Сравнение полученной модификации метода последовательных приближений с методом Ньютона, или методом контурных расходов (модификация метода Ньютона, таким образом, чтобы на каждой итерации выполнялось равенство нулю невязки линейной части, при условии, что невязка линейной части для начального приближения равна нулю), показывает практическую идентичность модифицированного метода последовательных приближений и данных методов, при условии выбора достаточно хорошего приближения. Но для сложных схем большой размерности, в особенности, граф которых не плоский, начального приближения зачастую недостаточно, для сходимости методов Ньютона и реже метода контурных расходов.

Однако, во многих реальных гидравлических сетях, используются различные регуляторы (регуляторы расхода, давления, обратные клапаны). Такие сети не укладываются в модель гидравлических сетей, представленную выше, где Q_j, s_i, H_i являются величинами постоянными. Эти величины не всегда могут быть заданы заранее в качестве постоянных величин, а должны считаться функциями неизвестных расходов x_i и давлений p_j(или напоров h_i), определяющих искомое потокораспределение в гидравлической сети, т.е.

$$Q_j = Q_j(p_j), s_i = s_i(x_i, h_i), H_i = H_i(x_i). \tag{10}$$

Таким образом, значение этих характеристик меняются от одного стационарного режима к другому, они как бы определяются (регулируются) искомым решением, т.е. установившимся потокораспределением.

Основной метод расчета гидравлической сети с регулируемыми параметрами состоит в том, что она многократно пересчитывается как гидравлическая цепь с постоянными параметрами. Это приводит к двойным циклам итераций. При этом внутренний цикл сводится к применению метода последовательных приближений для получения очередного приближения расходов и давлений в предположении, что все регулируемые параметры зафиксированы какими-то величинами. Внешний цикл предназначается для пересчета этих регулируемых параметров по значениям *x* и *h,* полученным во внутреннем цикле.

Модифицированный метод позволяет производить расчет сетей с регулируемыми параметрами, и также обладает лучшей скоростью сходимости, чем базовый метод, правда, разница количества итерации в этом случае не столь велика. Т.о., показывается целесообразность модификации метода определения установившегося распределения потоков в разрабатываемых программах расчета тепловых сетей и нефтепроводов.

Во второй главе рассматривается обратная задача, задача идентификации параметров сети. В данном случае, рассматривается задача уточнения коэффициентов сопротивления по результатам ограниченного числа измерений. Предлагается подход, который позволяет уточнять коэффициенты сопротивления одновременно на всех участках сети при наличии определенного количества датчиков расхода и давления, а также нескольких известных режимов работы.

Данная задача сводится к решению системы нелинейных уравнений

$$F(\bar{y}) = 0. \tag{11}$$

Где $F = \bar{f}^{(1)} \cup ... \cup \bar{f}^{(p)}$. $f^{(l)}$ - вектор функция, представляющая из себя систему нелинейных уравнений, составленную для каждого режима *l*.

$$f^{(l)} = \begin{pmatrix} c_{11}x_1^{(l)} + ... + c_{1n}x_n^{(l)} - q_1^{(l)} \\ ... \\ c_{k1}x_1^{(l)} + ... + c_{kn}x_n^{(l)} - q_n^{(l)} \\ c_{k+11}s_1 \,|\, x_1^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_1^{(l)} + ... + c_{k+1n}s_n \,|\, x_n^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_n^{(l)} - H_1^{(l)} \\ ... \\ c_{n1}s_1 \,|\, x_1^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_1^{(l)} + ... + c_{nn}s_n \,|\, x_n^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_n^{(l)} - H_{n-k}^{(l)} \\ c_{n+11}s_1 \,|\, x_1^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_1^{(l)} + ... + c_{nn}s_n \,|\, x_n^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_n^{(l)} - \Delta h_1^{(l)} \\ ... \\ c_{n+R1}s_1 \,|\, x_1^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_1^{(l)} + ... + c_{n+Rn}s_n \,|\, x_n^{(l)} \,|^{\beta-1}\, x_n^{(l)} - \Delta h_R^{(l)} \end{pmatrix}. \tag{12}$$

Вектор неизвестных y выглядит следующим образом:

$$\bar{y} = (s_1,..., s_n, x_{d+1}^{(1)},..., x_n^{(1)}, x_{d+1}^{(p)},..., x_n^{(p)})^T \quad (13)$$

s_i - неизвестные коэффициенты сопротивления, $x_{d+1}^{(l)},..., x_n^{(l)}$ - неизвестные расходы для каждого режима работы l. Расходы $x_1^{(l)},..., x_d^{(l)}$ подразумеваются известными, т.к. на первых d участках стоят датчики расхода.

Показываются ограничения данной задачи, и выводится зависимость количества режимов необходимых для решения системы уравнений от количества датчиков.

В общем случае задача относится к классу некорректных задач, т.к. система нелинейных уравнений переопределена. Одним из подходов к решению данной системы может быть применение метода наименьших квадратов, смысл которого для полученной системы заключается в нахождении минимума сложной нелинейной функции:

$$\begin{aligned} F(s,x^{(l)}) = \sum_{l=1}^{p}\Big(\sum_{i=1}^{k}\big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_j^{(l)} - q_i^{(l)}\big)\cdot\big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_j^{(l)} - q_i^{(l)}\big) + \\ + \sum_{i=k+1}^{n}\big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|\,x_j^{(l)}|^{\beta-1} - H_{j-k}^{(l)}\big)\big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|\,x_j^{(l)}|^{\beta-1} - H_{j-k}^{(l)}\big) + \\ + \sum_{i=k+n+1}^{n+R}\big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|\,x_j^{(l)}|^{\beta-1} x_j^{(l)} - \Delta h_{i-k-r}^{(l)}\big)\cdot\big(\sum_{j=1}^{n} c_{ij}s_j\,|\,x_j^{(l)}|^{\beta-1} x_j^{(l)} - \Delta h_{i-k-r}^{(l)}\big)\Big) \end{aligned} \quad . \quad (14)$$

Необходимые условия экстремума для (14) сводятся к сложной системе нелинейных уравнений, решение которой требует преодоления многих вычислительных трудностей, увеличивающихся по мере роста ошибок измерений и степени несовместности системы.

В случае, когда количество уравнений системы (11) не намного превышает количество неизвестных (это характерно для расчета тепловых сетей), для решения системы (11) предлагается применить метод Ньютона, исключив часть уравнений и сведя систему к квадратной. Показывается обоснованность данного подхода. Задача хорошо решается в случае небольших размерностей. Но, так как матрица Якоби данной системы является плохо обусловленной, то для сетей с количеством участков больше двухсот не всегда удается получить решение с приемлемой точностью для всех коэффициентов сопротивлений.

Практическую и вычислительную эффективность предложенных выше моделей и методов можно существенно повысить за счет понижения размерности решаемых задач. Первая возможность здесь связана с применением, так называемого, эквивалентирования, или замены частей системы на эквивалентные, более простые, тем самым одновременно понижая размерность задачи и повышая обусловленность системы уравнений. Другой путь заключается в разбиении исходной общей системы уравнений на последовательность подсистем меньшей размерности.

На практике давления и расходы определяются по приборам, имеющим невысокий класс точности. Поэтому, описанные выше способы практически позволяют находить в силу неизбежной погрешности замеряемых величин лишь оценки искомых параметров трубопроводных сетей. Отмеченное же совпадение этих оценок с эталонными значениями x_i и s_i имеет место только в модельных ситуациях, когда исходные данные фактически не содержат ошибок, поскольку они задаются или вычисляются на ЭВМ путем решения прямых задач потокораспределения.

Заметим, однако, что как показывает опыт работы с нефтепроводными сетями (конечно, более простыми объектами, чем тепловые или водопроводные сети), увеличение количества датчиков, информация о рабочих режимах, и применение аналогичного подхода, позволяют значительно повысить точность моделирования.

В третьей главе рассматривается задача количественного регулирования распределения потоков в тепловых сетях. Данная задача возникла в рамках программы энергосбережения СОРАН при внедрении программы для расчета тепловых сетей Новосибирского академгородка.

В настоящее время регулирование отпуска тепловой энергии производится в основном на источниках тепла - ТЭЦ, котельных. В зависимости от погодных условий устанавливаются различные режимы работы тепловой сети. Например, различные режимы при температуре наружного воздуха от 8 °С до 0 °С, от 0 °С до –8 °С, от –8 °С до -39°С. Более точное регулирование применяется довольно редко. Причем регулирование теплового режима происходит за счет изменения температуры теплоносителя. Т.о. осуществляется качественное регулирование. Но зачастую этих режимов недостаточно, особенно в периоды кратковременных резких изменений температур. Как правило, в этом случае ТЭЦ не меняют своих тепловых режимов. Т.о. требуется более качественное регулирование подачи тепла, по крайней мере, некоторым привилегированным потребителям, для которых необходимо поддерживать постоянный температурный режим (больницы, родильные дома, отдельные технологические производства). Согласно предложению профессора Серова А.Ф.(ИТФ СОРАН), осуществление такого регулирования возможно за счет количественного регулирования, путем изменения расходов на участках сети. Для изменения теплового потока на объектах потребителей могут использоваться регуляторы расхода, или дополнительные подпорные насосы.

Таким образом, ставится задача определить требуемые активные сопротивления (сопротивления регуляторов расхода) привилегированных участков, затем попытаться установить функцию последовательного изменения активных сопротивлений для того, чтобы переход в новый режим происходил как можно более гладко. Кроме того, требуется определить расходы и, соответственно, распределение тепла для остальных потребителей и участков сети.

Рассмотрим систему (1), построенную для случая квадратичного закона гидравлического сопротивления. Допустим, что необходимо обеспечить заданный расход на первых p участках. Также, будем считать, что данные участки имеют регуляторы расхода, т.е. это участки с активным сопротивлением. Т.о., в системе (1) в качестве неизвестных будут выступать $s_j, j = 1,.., p$, и $x_j, j = p+1,.., n$. А первые $x_j \equiv \bar{x}_j, j = 1,.., p$ подразумеваются известными, $\bar{x}_j$- расходы, которые необходимо обеспечить на привилегированных потребителях. Обозначим фиксированные коэффициенты сопротивлений через $\bar{s}_j, j = p+1,.., n$. Тогда, система (1) примет вид:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{p} c_{ij}\bar{x}_j + \sum_{j=p+1}^{n} c_{ij}x_j = q_i, i = 1,.., k-1, \\ \sum_{j=1}^{p} c_{ij}s_j \mid \bar{x}_j \mid \bar{x}_j + \sum_{j=p+1}^{n} c_{ij}\bar{s}_j \mid x_j \mid x_j = h_{i-k+1}, i = k,.., n \end{cases} \qquad (15)$$

Неизвестным является вектор

$$\bar{y} = (s_1,..., s_p, x_{p+1},.., x_n)^T. \qquad (16)$$

Данная нелинейная система, имеет n уравнений и n неизвестных, построена с использованием матрицы связности графа гидравлической сети и матрицы контуров. В данной постановке задачи верна следующая теорема.

Теорема: *Пусть y – вектор решения системы нелинейных уравнений(15), составленной для задачи определения активных сопротивлений, такой, что каждая компонента y_i не равна нулю. Если, при исключении дуг графа $i < p+1$, соответствующих известным расходам, связность графа гидравлической сети не нарушается, то вектор y - единственный вектор решения системы (15).*

В работе предлагается метод решения системы нелинейных уравнений (15), т.е. метод определения активных сопротивлений привилегированных участков и определения соответствующего им распределения потоков.

Кроме того, предлагается методика последовательного изменения активных сопротивлений, при котором переход между режимами осуществляется наиболее плавно.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. получен алгоритм, имеющий значительные преимущества по скорости сходимости, а, следовательно, и по времени необходимому для решения задачи определения распределения потоков, по сравнению с исходным методом последовательных приближений. Полученный метод позволяет решать гидравлические задачи не только для случая линейного и квадратичного законов гидравлического сопротивления, но и для более общего случая (степень меняется в пределах от 1 до 2-х). Представляется возможным использовать алгоритм для расчета электрических сетей, с нелинейностями определенного вида, когда вольтамперная характеристика элемента проводимости представляет собой степенную функцию. Доказана единственность решения задачи определения распределения потоков.
2. Предложен подход и методы, позволяющие в определенных случаях уточнять коэффициенты сопротивлений участков трубопроводных сетей на основании показаний ограниченного количества датчиков. Кроме того, можно производить статистические оценивания гидравлических сетей и выдавать указание на установку датчиков для получения возможности более точного моделирования сети.
3. Решена задача количественного управления тепловыми сетями, задача обеспечения постоянной температуры на привилегированных потребителях. Доказана единственность определения коэффициентов сопротивлений у привилегированных потребителей. Предложен метод, позволяющий осуществлять плавный переход между различными режимами работы ТЭЦ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мызников А.М. Решение больших систем нелинейных уравнений применительно к задачам расчета гидравлических, тепловых и электрических сетей // Математические структуры и моделирование. Омск: Омский гос. ун-т., 2003, вып. 11, с. 15-19.
2. Мызников А.М., Мызникова Т.А. Метод численного расчета водопроводных сетей // Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. Том 2. / Под редакцией В.П. Савиных, В.В. Вишневского. М.: Академия наук о Земле, 2002. – с. 164 -165.
3. Мызников А.М. Определение коэффициентов сопротивления участков в сложных тепловых сетях по результатам ограниченного числа измерений // Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 36-й Региональной Молодежной конференции. Екатеринбург: УрО РАН, 2005, с. 87 – 91.
4. Мызников А.М. Применение метода Ньютона для решения задачи уточнения коэффициентов сопротивления участков сложных гидравлических сетей // Материалы XLIII Международной научной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс”: Математика/ Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2005, с. 23-24.
5. Мызников А.М., Регулирование распределения потоков в тепловых сетях // Информационные технологии моделирования и управления, Воронеж: Научная книга, 2005 вып. N4(22), с. 618-623.
6. Мызников А.М., Файзуллин Р.Т., Уточнение коэффициентов сопротивления в сложных гидравлических сетях по результатам ограниченного числа измерений // Теплофизика и аэромеханика, Новосибирск, 2005, том 12, № 2, с. 483-486.