

*И. П. ГАМАЮН*, д-р техн. наук,  
*В. В ЛИТОВЧЕНКО*, студент НТУ «ХПИ»

## **ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ В ГОРОДСКИХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЯХ**

В статті пропонується комплекс програмних засобів, які розроблено на основі математичних моделей та алгоритмів, що забезпечують оптимізацію розподілу потоків води в інженерних мережах міста.

В статье предлагается комплекс программных средств, которые разработаны на основе математических моделей и алгоритмов, обеспечивающих распределение потоков воды в инженерных сетях города.

In the article the complex of software which are developed on the basis of mathematical models and the algorithms ensuring distribution of water deluges in engineering networks of city is offered.

**Введение.** Системы водоснабжения больших городов относятся к классу транспортных восстанавливаемых систем жизнеобеспечения городов длительного действия и представляют собой сложные разветвленные трубопроводные системы с глубокими внутренними связями, функционирующими под воздействием многих случайных факторов. Опыт эксплуатации городских и промышленных систем подачи и распределения воды (СПРВ) показывает, что они функционируют в условиях топологических, структурных и режимных возмущений, обусловленных аварийным отключением элементов, присоединением новых участков, сетевых фрагментов, районов с собственной сетевой инфраструктурой, источников, потребителей, резервных линий и т.п. Переменность структуры СПРВ усугубляется их чрезвычайной разветвленностью, что влечет за собой необходимость решения систем уравнений больших размерностей, обработкой и хранением гигантских информационных массивов, не согласующихся с ограниченными ресурсами вычислительной техники.

Поскольку СПРВ являются большими гидравлическими системами, отображаемыми бесконечными структурными графами, для возможностей моделирования возмущенного состояния необходимы структурные и масштабные преобразования на графах, в рамках декомпозиционно - топологических решений, с привлечением идеи энергетического эквивалентирования.

Традиционные методы моделирования в основном охватывают область установившегося состояния функционирующих систем или расчетных режимов потребления проектируемых систем. Модели создаются на основе теории графов, которая предоставляет в распоряжение инженера удобный

аппарат для отражения структурных свойств систем и отношений между объектами самой разнообразной природы. Благодаря наглядности и простоте этот аппарат сейчас завоевал широкое признание и повсеместно используется в научно-технической литературе.

Появившиеся в последнее время декомпозиционно–топологические методы моделирования динамического состояния систем водоснабжения не нашли пока должного признания, вместе с тем актуальным является их дальнейшее совершенствование и развитие.

В свою очередь для управления системами водоснабжения необходимо, чтобы их проектирование велось с учетом надежности и управляемости, гарантирующих обеспечение необходимого запаса пропускной способности и возможности оперативного изменения структуры и параметров распределительных сетей, а также удовлетворяющих требованиям надежности и экономичности инженерных систем водоснабжения (новых или реконструируемых), работающих в условиях нерегулируемого непрерывного возрастания водопотребления, сопровождающегося циклическими изменениями. Необходимо гарантировать обеспечение потребителей водой при возможных пиковых нагрузках и при любых отказах элементов системы, а также обеспечение экономически целесообразной работы системы в периоды малых нагрузок. Сложность решения такой проблемы очевидна.

**Анализ основных программных продуктов для решения проблемы потокораспределения.** Исключительная сложность обоснования оптимальных решений при проектировании систем подачи и распределения воды, многообразии факторов, влияющих на технико-экономические показатели этих систем, определяют особенности практических методов их расчета.

Для реализации подобных методов разработан ряд программных продуктов, который можно разделить на следующие основные классы:

- основывающийся на платформе системы автоматизированного проектирования (САПР);
- основывающийся на платформе геоинформационной системы (ГИС).

К программным системам, построенным на платформе САПР и обеспечивающим решение проектных задач, относятся CADdy фирмы Ziegler (Германия), группа продуктов CREDO фирмы «Кредо-Диалог» (Минск, Белоруссия), система ReCAD (разработка ООО ИДЦ «Индор», г. Томск), семейство программных продуктов Civil Engineering корпорации Intergraph, США и многие другие.

Программные продукты семейства Civil Engineering предназначены для разработки проектов автомобильных и железных дорог, ландшафтов и инженерных сетей. В состав большинства продуктов включены средства DraftWorks. Большинство этих продуктов являются приложениями к интегрированной графической среде MicroStation (Bentley Systems Inc.), использующими все мощности данного графического редактора. Наиболее

известными системами в рамках семейства Civil Engineering можно отнести ISOGEN (фирма Alias Ltd), CADPipe ISO (фирма Orange Technologies), AutoPLANT Isometrics (фирма Rebis), L/ISO (фирма Logos).

К программным комплексам, имеющим в себе функции управления инженерными сетями и функции ГИС, относятся программные продукты, разработанные фирмами ИВЦ «Поток» (Россия) и ИВК «Модель» (Украина). Ими созданы пакеты комплексов программно-технических средств различных тематик «Водоснабжение и водоотведение» (ИГС «WS-Inventory»), «Теплоснабжение» (ИГС «HeatGraph»), «Газоснабжение» (ИГС «GasGraph») [1,2]. Также следует отметить разработки компании «ПолиTERM»: ГИС Зулу и системы теплового расчета на ее базе.

Из числа зарубежных фирм можно выделить Haestad Methods, Inc с системами посвященными гидравлическим расчетам WaterCAD и Cybernet. Система ODULA 2.0 (фирма HYDROINFORM Prague), предназначена для строительства сетевой модели водопроводной сети. Системы семейства SmallWorld фирмы GE Network Solutions предназначены для электрических, водопроводных, тепловых и газовых сетей [3]. Система FRAMME (фирма Intergraph) предназначена для построения моделей любых инженерных сетей и создания информационных систем на их базе. Система AutoPLANT (фирма Rebis совместно с Bentley Systems, Inc.) предназначена для пространственного и информационного моделирования сложных трубопроводных и электрических сетей, и одновременно является, по сути, специализированной системой проектирования.

К основным функциям дополнительных модулей, предназначенных для моделирования инженерными сетями, можно отнести:

- построение трехмерных моделей инженерных сетей;
- работа с телеметрической информацией;
- работа со схемами, планами, разметкой сооружений и оборудования;
- ведение архива повреждений и изменения параметров;
- выполнение технологических расчетов;
- выдача рекомендаций по локализации аварий;
- моделирование переключений.

К базовым возможностям информационных систем для инженерных сетей предъявляются следующие общие требования:

- наличие схематического представления сети с имитацией состояния элементов и участков сети;
- наличие геометрического представления сети на плане или карте с размерными привязками, пригодное для чертежного представления и задач согласования;
- наличие атрибутивного описания технических параметров элементов сети;
- описание движения (жизненного цикла) сети и ее элементов;

- наличие средств документооборота.

Сравнение различных видов систем, нашедших широкое распространение на инженерных сетях в мировой практике приведено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение возможностей систем

Параметр	Система							
	Дакар	ИГС WS-Inventory	ИГС HeatGraph	FRAMME	Анарэс	Зулу	SmallWorld	ArcFM/Arc Schematics
Представление сети на плане местности	-	+	+	+	-	+	+	+
Привязка с разметкой	-	+	+	+	-	+	-	-
База данных по техническим параметрам объектов сети	-	+	+	+	-	+	+	+
Полное отслеживание неисправностей, работ, исполнителей, затрат	-	-	-	-	-	-	+	-
Отслеживание изменений параметров оборудования	-	-	-	-	-	-	+	-
Наличие оперативной схемы с имитацией состояний элементов	+	+	+	+	+	+	+	+
Ведение документов	-	-	-	+	-	-	-	-

Для оценки практической пригодности рассмотренных выше классов систем введем такие важные эксплуатационные качества, как простота использования, требования к оборудованию, наглядность результатов работы, эффективность использования, сложность внедрения, функциональность и стоимость. Оценка этих параметров приводится в табл.2.

В настоящее время наибольшее распространение имеют следующие программные комплексы, разработанные компанией «Политерм» (г. Санкт-Петербург), Датским Гидравлическим Институтом (DHI Water & Environment) и лабораторией Агентства защиты окружающей среды США (г. Цинцинати):

- ZuluArcHydro - расчеты систем водоснабжения;

- Mike Net;
- Epanet 2.0.

Наибольшими функциональными возможностями обладает программный комплекс MIKE NET [4], который предназначен для моделирования различных гидравлических процессов в системах питьевого водоснабжения и позволяющий решать многие проблемы эксплуатации сетей. Система позволяет моделировать сети водоснабжения как в статическом режиме (мгновенное распределение), так и в динамическом режиме (распределение воды во времени). Также программа дает возможность рассчитывать характеристики качества воды, а именно распределение химических веществ в сети, застой воды и отслеживать распределение воды в сети из конкретного источника.

Таблица 2

Сравнение классов информационных систем для инженерных сетей

Параметр	Класс			
	САПР	ГИС	Системы управления на базе СУБД	Специализированные системы
Простота использования	–	–	+	+
Требования к оборудованию	высокие	высокие, средние	низкие	высокие, средние
Наглядность результатов	+	+	–	+
Эффективность использования	–	–	+	+
Сложность внедрения	–	–	+	–
Функциональность	–	–	–	+
Стоимость	–	–	+	–

### **Характеристика предлагаемой программной реализации.**

Рассмотренные программные комплексы, как правило, имеют очень высокую цену и требуют больших вычислительных ресурсов. В тоже время вышеуказанные комплексы не приспособлены для применения в автоматизированной системе поддержки принятия решения в случае оптимизации работы систем водоснабжения, поскольку не решают все необходимые для оптимизации задачи, либо решают их не в полном объеме и в не заданной постановке.

В связи с этим является актуальным разработка программного комплекса для расчета систем водоснабжения, который может быть интегрирован в

автоматизированную систему поддержки принятия решения и позволит решать конкретные задачи в требуемой постановке.

При разработке подобного комплекса необходимо построить соответствующую математическую модель, а также разработать необходимое современное программное обеспечение, в котором предусматривается применение современной системы управления базой данных и языков программирования.

В основу подобной разработки взята математическая модель установившегося потокораспределения в инженерных сетях (водопроводных, газовых и др.).

Согласно [5,6], водопроводную или газовую сеть можно рассматривать как сильно связанный линейный граф, на котором выполняются два закона Кирхгофа.

Этот граф содержит  $v$  вершин и  $e$  дуг, каждой из которых поставлены в соответствие ряд активных и пассивных элементов и две переменные величины: расход или последовательная переменная  $q_i$ , и потеря напора, или параллельная переменная  $h_i$ , связанные между собой монотонной зависимостью, определяемой параметрами этих элементов.

Математическая модель установившегося потокораспределения в инженерных сетях задается с помощью матричного представления графа сети и его элементов. Связь между параллельными и последовательными переменными инженерной сети, заданной с помощью линейного графа, описывается системой нелинейных уравнений вида:

$$f_r = \sum_{i=1}^{m_r} h_{ri}^{(n)}(q_r) - \sum_{i=1}^{n_r} h_{ri}^{(a)}(q_r) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1ri} \left[ \sum_{j=1}^{m_i} h_{ij}^{(n)}(q_i) - \sum_{j=1}^{n_i} h_{ij}^{(a)}(q_i) \right] = 0, (1)$$

$$(r = \overline{v, e}), (2)$$

$$q_i = \sum_{r=v}^e b_{1ri} \cdot q_r, (3)$$

$$(i = \overline{1, v-1}), (4)$$

где  $h_{ri}^{(n)}, h_{ri}^{(a)}$  – параллельные переменные  $i$ -го пассивного и активного элемента  $r$ -й хорды дерева;

$m_r$  – число пассивных элементов хорды;

$n_r$  – число активных элементов;

$b_{1r}$  – элементы матрицы В;

$h_{ij}^{(n)}, h_{ij}^{(a)}$  – параллельные переменные  $j$ -го пассивного и активного элементы  $i$ -й ветви дерева;

$m_i$  – число пассивных элементов ветви;

$n_i$  – число активных элементов ветви.

Зависимость  $h_{ij}^{(n)}(q_i)$  может быть аппроксимирована следующей формулой:

$$h_{ij}^{(n)}(q_i) = \operatorname{sgn} q_i r_{ij} |q_i|^{f_{ij}}, \quad (5)$$

где  $r_{ij}, f_{ij}$  – сопротивление и коэффициент нелинейности  $j$ -го пассивного элемента  $i$ -й ветви.

Переменная  $j$ -го активного элемента  $i$ -й ветви  $h_{ij}^{(n)}(q_i)$  определяется нагрузочной характеристикой этого элемента и может быть аппроксимирована в заданной рабочей области полиномом второй степени.

Для определения потокораспределения в инженерной сети при известной ее структуре и параметрах пассивных и активных элементов могут быть использованы методы, пригодные для решения систем нелинейных уравнений (1) или методы безусловной минимизации/

Функционально в программном комплексе можно выделить три подсистемы:

- подсистема обработки первичной информации и расчета параметров сети;
- подсистема формирования математического представления графа и его элементов;
- подсистема расчета потокораспределения в сети на основе методов безусловной минимизации.

В первой подсистеме [7] программного комплекса на основе исходных данных производится расчет гидродинамических и аэродинамических сопротивлений  $r_{ij}$ , коэффициентов аппроксимации нагрузочных характеристик активных элементов и др. Нагрузочная характеристика  $j$ -го активного элемента представлена в виде:

$$h_j = a_0 + a_1 q_j + a_2 q_j^2, \quad (6)$$

$$j = \overline{1, k}, \quad (7)$$

где  $a_0, a_1, a_2$  – коэффициенты аппроксимации;  $k$  – число активных элементов сети.

Для определения коэффициентов аппроксимации используется метод наименьших квадратов. Алгоритм метода основывается на решении следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m y_i &= ma_0 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2; \\ \sum_{i=1}^m y_i x_i &= a_0 \sum_{i=1}^m x_i + a_1 \sum_{i=1}^m x_i x_i + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 x_i; \\ \sum_{i=1}^m y_i x_i^2 &= a_0 \sum_{i=1}^m x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^m x_i x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 x_i; \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где  $y_i$  – зависимая переменная (величина напора);

$x_i$  – независимая переменная (величина расхода);

$m$  – число точек аппроксимации ( $m > 3$ ).

В результате работы программы по заданным рабочим точкам нагрузочной характеристики формируется массив данных коэффициентов аппроксимации полиномов (4).

Во второй подсистеме [7] программного комплекса производится формирование математического представления графа и его элементов. Граф сети в программном модуле задается матрицей инцидентий  $A$  размером  $(v \times e)$  Матрица  $A$  служит для получения программным путем главного сечения графа, которое математически описывается матрицей главных сечений  $Q=[q_{ij}]$  размерности  $(v-1) \times e$  и ранга  $(v-1)$  и системы фундаментальных циклов, которая математически описывается цикломатической матрицей  $B=[b_{ri}]$  размерности  $\mu \times e$  и ранга  $(\mu = e - v + 1)$ . Из матрицы  $B$  программным путем компонуется подматрица  $B_1$ , элементы которой используются при разработке математической модели сети, заданной системой уравнений (1) и (2).

Формирование матрицы  $Q$  и  $B$  удобно осуществить программным путем, используя алгоритм, приведенный в [1]. Формирование подматрицы  $B_1$  из матрицы  $B$  осуществляется программным путем с помощью, процедуры преставления столбцов матрицы и приведение матрицы  $B$  к виду:

$$B^* = [B_1 / I], \quad (9)$$

где  $B_1$  – подматрица размерности  $\mu \times (v-1)$  включающая в себя первые  $(v-1)$  столбцов матрицы  $B^*$ ;

$I$  – единичная матрица размером  $\mu \times \mu$ .

Во второй подсистеме программного комплекса вычисляются первые частные производные относительно составляющих вектора  $\overline{q_2}$  (последовательных составляющих хорды графа сети) и элементы матрицы Гессе  $H$  (матрицы вторых частных производных):

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 y}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 y}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 y}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 y}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Вычисление производных в заданной точке  $x_i$  осуществляется по следующим приближенным формулам:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{y(\Delta x_i) - y(x_i)}{\Delta x}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} \approx \frac{y(2\Delta x_i) - 2y(\Delta x_i) + y(x_i)}{\Delta x^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x_i \partial x_j} \approx \frac{y(\Delta x_i, \Delta x_j) - y(\Delta x_i) - y(\Delta x_j) + y(x_i)}{\Delta x^2}, \quad (13)$$

где  $\Delta x$  – приращение аргумента или шаг дифференцирования;

$$\begin{aligned} y(x_i) &= y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n); \\ y(\Delta x_i) &= y(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n); \\ y(\Delta x_j) &= y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j + \Delta x_j, \dots, x_n); \\ y(2\Delta x_i) &= y(x_1, \dots, x_i + 2\Delta x_i, \dots, x_n); \\ y(2\Delta x_j) &= y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_j + 2\Delta x_j, \dots, x_n). \end{aligned}$$

При использовании методов безусловной минимизации в алгоритмах поиска решений используется обратная матрица Гессе, которая формируется программным путем во второй подсистеме комплекса. Для этого создается новая расширенная матрица путем дописывания к известной матрице единичной. Затем, используя алгоритм симплексного метода, путем последовательного перехода от одного базисного решения к другому, формируется на месте исходной матрицы – единичная. При этом, здесь нет необходимости определять ключевой столбец и строку, как того требует симплексный метод, а непосредственно, начиная с первого столбца расширенной матрицы можно заниматься ее преобразованиями, поскольку отпадает необходимость анализа признака оптимальности и вычислений, связанными с определением целевой функции (линейной формы). К тому же такой подход для формирования обратной матрицы легко реализуется программным путем.

На данном этапе разработки программного комплекса для моделирования потокораспределения в инженерных сетях с целью решения прямой задачи

анализа в третьей подсистеме комплекса [7] реализован алгоритм безусловной минимизации функций, в основу которого положен метод Ньютона. Основное рекуррентное соотношение для метода Ньютона имеет вид:

$$\overline{q_2}^{(k+1)} = \overline{q_2}^{(k)} - (H^{-1})^{(k)} \cdot \overline{f}^{(k)}, \quad (14)$$

где  $\overline{q_2}$  – значение последовательной составляющей хорды графа сети на  $k$ -м шаге итерации;

$k$  – шаг итерации;

$H^{-1}$  – обратная матрица Гессе;

$\overline{f}^{(k)}$  – значение параллельной переменной на  $k$ -ом шаге итерации

Программный комплекс ориентирован для проведения расчетов, связанных с определением потокораспределения в водопроводных инженерных сетях, а также реализация математических моделей и алгоритмов, применяемых в самом программном комплексе, выполняются с использованием программных средств разработки программных продуктов Delphi 7.0.

**Выводы.** Разработанный программный комплекс применим в автоматизированной системе поддержки принятия решения в цикле управления системой потокораспределения энергоресурсов, когда возникает необходимость в оптимизации распределения потоков воды по инженерным сетям города. Процесс освоения комплекса персоналом требует больших временных затрат. Однако эти затраты нужны, поскольку обеспечивают корректную работу программного комплекса в процессе его эксплуатации. Работоспособность и эффективность проверялась на тестовых примерах решения задач, размерность которых близка к промышленной.

Внедрение комплекса оптимизации режимов работы систем водоснабжения позволит сэкономить капитальные затраты и материальные ресурсы.

**Список литературы:** 1. Водоснабжение и водоотведение, пакет комплексов программно-технических средств АСУ, АСУ ТП, техническое описание. – М.: ИВЦ «Поток», ИВК «Модель», 1997. – 20 с. 2. Жуковский О.И., Гриценко Ю.Б. Разработка моделирующих компонент к кадастрам инженерных сетей // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС – 4 – 98): Тезисы докладов 4-й международной научно – практической конференции, Барнаул, 21-23 сентября 1998 г. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 1998, с. 28-29. 3. Вайсфельд В.А., Ексаев А.Р. Принципиальные основы применения ГИС-технологий для городских инженерных коммуникаций // Инженерные коммуникации и геоинформационные системы: материалы первого учебно-практического семинара, «ГИС-Ассоциация», 14-17 октября 1997 г. – М.: 1997, с. 3-9. 4. Программный комплекс Mike Net «Руководство пользователя». 5. Евдокимов А.Г. Минимизация функций и ее приложение к задаче автоматизированного управления инженерными сетями. – Харьков : Вища шк., 1985. – 363 с. 6. Рябченко И.Н. Моделирование процессов потокораспределения в системах подачи и распределения воды с использованием ПЭВМ. – Харьков : ГСИ «Основа» ХГУ, 1998 г.

УДК 519.5:681:513

**А. А. ПАВЛОВ**, д-р. техн. наук, НТУУ «КПШ»,  
**Е. И. ЛИЦУК**, ас., НТУУ «КПШ»

## **ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ**

В статті розглянута методика вирішення задач багатокритеріального вибору за допомогою Методу аналізу ієрархій (МАІ). Запропоновано та обґрунтовано алгоритм, в якому при вирішенні задач багатокритеріального вибору за допомогою МАІ експерту не потребується виконувати попарні порівняння альтернатив на нижньому рівні ієрархії.

В статье рассмотрена методика решения задач многокритериального выбора с помощью Метода анализа иерархий (МАИ). Предложено и обосновано алгоритм, в котором при решении задач многокритериального выбора с помощью МАИ не требуется выполнять попарные сравнения альтернатив на нижнем уровне иерархии.

In article the technique of the decision of problems of multicriteria choice with the help of the Analytic Hierarchy Process by T.Saaty (AHP) is considered. It is proposed and is substantiated algorithm in which at the decision of problems of multicriteria choice with help of AHP it is not required to carry out paired comparisons of alternatives at the bottom level of hierarchy.

### **Введение.**

В настоящее время для решения задач многокритериального выбора наиболее часто используемым является метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т.Саати. В качестве задач многокритериального выбора могут выступать как задачи выбора одного варианта из нескольких предлагаемых, так и задачи управления проектами, в том случае, когда задачу управления проектами (прогнозирования) можно представить в виде иерархического дерева Саати. Метод анализа иерархий предполагает декомпозицию проблемы на более простые составляющие части и обработку суждений лица, принимающего решение (ЛПР). В МАИ основным методом сравнения ЛПР объектов (альтернатив, критериев) является метод парных сравнений.

Взаимоотношения между критериями учитываются путем построения иерархии критериев и применением парных сравнений для выявления важности критериев и подкритериев. Метод отличается простотой и дает хорошее соответствие интуитивным представлениям. Главным недостатком этого подхода является большое количество требуемой экспертной информации,