

СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД ЗОНИРОВАНИЯ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ

А. Д. Тевяшев

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*
E-mail: tad45@mail.ru

О. И. Матвиенко

Аспирант*

E-mail: olga_mat@ukr.net

*Кафедра прикладной математики
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 16, г. Харьков, Украина, 61166

В роботі розглянуто метод зниження сумарних надлишкових тисків в мережах водопостачання шляхом їх зонування на основі стохастичної моделі квазістаціонарних режимів в системі подачі та розподілу води і встановлення регуляторів тиску. Сформульована і розв'язана задача оптимального розподілу навантаження між регуляторами тиску, що працюють на ізольовану зону

Ключові слова: зонування, квазістаціонарний режим, дисперсія, регулятор тиску, надлишковий тиск, стохастична модель

В работе рассмотрен метод снижения суммарных избыточных давлений в водопроводных сетях путём их зонирования на основе стохастической модели квазистационарных режимов в системах подачи и распределения воды и установки регуляторов давления. Сформулирована и решена задача оптимального распределения нагрузки между регуляторами давления, работающими на каждую зону

Ключевые слова: зонирование, квазистационарный режим, дисперсия, регулятор давления, избыточное давление, стохастическая модель

1. Введение

Системы водоснабжения Украины в настоящее время достаточно изношены и имеют ряд проблем экономического и технического характера. Одна из наиболее острых проблем - это потери воды за счет утечек, которые составляют иногда более 50 % объема подаваемой воды.

Когда отдельные участки водопровода имеют значительную разницу отметок высоты, то в пониженных точках сети могут возникать давления, превышающих допустимые. Величина утечек прямо пропорциональна величине избыточного давления. Поэтому минимизация утечек возможна за счет снижения избыточного давления в узлах сети.

Один из способов снижения избыточного давления в узлах сети - реинжиниринг водопроводных сетей, зонирование и установка регуляторов давления. Это позволит существенно, до 25-30 % снизить избыточное давление в сети, а значит, сэкономить водные и энергетические ресурсы.

2. Постановка проблемы

Разделение водопроводной сети на зоны применяется при значительной разности геодезических отметок обслуживаемых водопроводом участков, различной этажности застроек микрорайонов города и, следовательно, значительной разнице свободных напоров, требуемых различными категориями потребителей.

Те узлы водопроводной сети, в которых избыточные давления существенно превышают заданное пороговое значение, необходимо сгруппировать в свя-

занные участки (зоны) и предусмотреть установку регуляторов давления для каждой зоны.

Цель данной работы – разработка метода реинжиниринга водопроводных сетей путём их зонирования и установки регуляторов давления, реализация которого обеспечивает существенное снижение суммарных избыточных давлений в узлах водопроводной сети, объемов утечек воды и экономию материальных и энергетических ресурсов.

Для достижения поставленной цели используется усовершенствованный метод зонирования водопроводной сети на основе стохастической модели квазистационарных режимов в системах подачи и распределения воды и оптимизации параметров регуляторов давления для каждой из выделенных зон.

3. Литературный обзор

Вопросы зонирования водопроводной сети рассматривались Абрамовым Н. Н. с целью снижения давления в трубах водопроводных сетей и уменьшения количества энергии, затрачиваемой на подъём воды [1]. Для каждой зоны устанавливается своя насосная станция. Использовались 2 схемы зонирования: параллельное и последовательное.

Проблемы зонирования решались Бродским А. Л., который ставил задачу усовершенствования системы зонирования водопроводных сетей за счёт нового выполнения элементов и связей между ними, позволяющих осуществить дифференциацию давления в разных точках сети.

Также задачи оптимизации режимов работы систем водоснабжения решались Шевелевым Ф. А., Андрияшевым М. М., Евдокимовым А. Г., Тевяшевым А. Д.,

Петросовым В. А., Steinbach М. С. [2 – 7] и другими. Проанализировав выше перечисленные исследования, мы предлагаем усовершенствованный метод зонирования водопроводных сетей.

4. Усовершенствованный метод зонирования водопроводных сетей

4. 1. Стохастическая модель квазистационарных режимов в системах подачи и распределения воды

Потребление воды в разное время суток неравномерно. Модель установившегося потокораспределения рассчитывается для максимального потребления и эффективно используется на этапах проектирования и реконструкции сети. Детерминированные модели установившегося потокораспределения (УПР) в водопроводных сетях [8, 9] описывают систему в конкретный момент времени $t \in [0, T]$. Поэтому, даже незначительное изменение параметров модели или граничных условий существенно искажают решение.

Фактические режимы работы сети являются существенно нестационарными. В реальных условиях основными возмущающими факторами водопроводных сетей являются стохастические процессы потребления воды, которые зависят от огромного количества не контролируемых и не управляемых факторов, а параметры модели УПР, оцениваемые по выборкам экспериментальных данных конечной длины, сами являются случайными величинами. Для оперативного управления и планирования рациональных режимов функционирования сети более адекватными являются модели квазистационарных режимов подачи и распределения воды на заданном интервале времени $[0, T]$ [10].

Не нарушая общности, рассмотрим водопроводную сеть с одним активным источником – насосной станцией. Для представления структуры сети в виде орграфа $G(V, E)$, где V – множество вершин, E – множество дуг ($e = \text{Card}(E)$, $v = \text{Card}(V)$), реальная сеть добавляется нулевой вершиной и фиктивными хордами, соединяющими нулевую вершину со всеми входами и выходами сети.

Для математической формулировки задачи производят следующее кодирование сети: дерево графа выбирают таким образом, чтобы фиктивные участки сети стали хордами. При этом реальные участки частично станут хордами, а частично – ветвями дерева. Ветви дерева с насосом присваивают номер 1, остальные ветвям – от 2 до $v-1$, хордам реальных участков – от v до $v + \eta_2 - 1$, фиктивным с заданными узловыми расходами – от v до e , где η_2 – количество хорд реальных участков.

Будем предполагать, что на заданном интервале времени $[0, T]$ расходы потребителей являются независимыми случайными величинами, которые имеют нормальное распределение с известными математическими ожиданиями и дисперсиями:

$$\begin{aligned} \bar{q}_i &= M(q_i(\omega)), \quad \sigma_{q_i}^2 = D(q_i(\omega)), \\ q_i(\omega) &\in N(\bar{q}_i, \sigma_{q_i}^2), \quad i = (v + \eta_2, \dots, 5). \end{aligned} \tag{1}$$

Кроме того, будем предполагать, что напор на насосной станции- $h_1^{(a)}(\omega)$ и гидравлическое сопротивление i -го участка трубопровода $S_i(q_i(\omega))$ ($i = 1, \dots, v + \eta_2 - 1$) являются также случайными величинами.

Тогда стохастическая математическая модель квазистационарных режимов в системах подачи и распределения воды на заданном интервале времени $[0, T]$ примет вид:

$$\begin{aligned} M_{\omega}(\text{sgn } q_r(\omega) S_r(q_r(\omega)) q_r^2(\omega) + \\ + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1r} \text{sgn } q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega)) &= 0, \tag{2} \\ (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\omega}(h_r^{(c)}(\omega) - h_1^{(a)}(\omega) + \\ + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1r} (\text{sgn } q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^{(g)})) &= 0, \tag{3} \\ r = (v + \eta_2, \dots, 5). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M(q_i(\omega)) = M_{\omega} \left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{1r} q_r(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{1r} q_r(\omega) \right), \\ (i = 1, \dots, v - 1). \end{aligned} \tag{4}$$

$q_i(\omega)$, $S_i(q_i(\omega))$, $h_r^{(c)}(\omega)$, $h_1^{(a)}(\omega)$ – случайные величины, характеризующие: $q_i(\omega)$ – расход воды на i -м участке трубопровода; $S_i(q_i(\omega))$ – гидравлическое сопротивление i -го участка трубопровода ($i = 1, \dots, v + \eta_2 - 1$); $h_r^{(c)}(\omega)$ – свободные напоры в узлах сети $r = (v + \eta_2, \dots, 5)$; $h_1^{(a)}(\omega)$ – напор насосной станции; $M\{\}$ – математическое ожидание случайной величины $\{\}$; $h_i^{(c)+}$ – минимальный допустимый напор в узле i .

4. 2. Постановка задачи оперативного планирования водопроводной сети

На содержательном уровне задача оперативного планирования режима работы системы водоснабжения на интервале времени $[0, T]$ заключается в вычислении такого режима работы НС, при котором для прогнозируемых объемах водопотребления $q_i(\omega) \in N(\bar{q}_i, \sigma_{q_i}^2)$, во всех узлах водопроводной сети $i = (v + \eta_2, \dots, 5)$. на заданном интервале времени $[0, T]$ математическое ожидание суммы избыточных давлений в узлах водопроводной сети будет минимальным:

$$M_{\omega} \left(\sum_{i=v+\eta_2}^e (h_i^{(c)}(\omega) - h_i^{(c)+}) \right) \rightarrow \min_{h_i^{(a)}} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} M_{\omega}(\text{sgn } q_r(\omega) S_r(q_r(\omega)) q_r^2(\omega) + \\ + \sum_{i=1}^{v-1} b_{1r} \text{sgn } q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega)) &= 0, \tag{6} \\ (r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \end{aligned}$$

$$M\left(h_r^{(c)}(\omega) - h_1^{(a)}(\omega) + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri} (\operatorname{sgn} q_i(\omega) S_i(q_i(\omega)) q_i^2(\omega) + h_i^{(g)})\right) = 0, \quad (7)$$

$$r = (v + \eta_2, \dots, 5),$$

$$M(q_i(\omega)) = M\left(\sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{iri} q_r(\omega) + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{iri} q_r(\omega)\right), \quad (i=1, \dots, v-1). \quad (8)$$

$$P(h_i^{(c)}(\omega) \geq h_i^{(c+)}) \geq \alpha, \quad (\alpha \cong 1), \quad i = (v + \eta_2, \dots, 5). \quad (9)$$

Неравенство (9) определяет условия того, что все потребители, подключённые к каждому $i = (v + \eta_2, \dots, 5)$ узлу, будут обеспечены водой в прогнозируемых объёмах на заданном интервале времени $[0, T]$.

Задача (5) – (9) относится к классу нелинейных задач стохастического программирования М-типа с комбинированными вероятностными и статистическими условиями.

Для её решения необходимо построить детерминированный эквивалент.

4.3. Построение детерминированного эквивалента задачи оперативного планирования водопроводной сети

Заменяя в системе уравнений (5) – (8) все случайные величины их математическими ожиданиями, мы получаем систему уравнений математической модели установившегося потокораспределения, в качестве параметров и переменных в которой выступают не значения случайных величин, а оценки их математических ожиданий.

Для построения детерминированного эквивалента условия (9) необходимо определить статистические свойства зависимых переменных $h_r^{(c)}(\omega)$, $r = (v + \eta_2, \dots, 5)$ в зависимости от статистических свойств исходных данных $q_i(\omega)$, $i = (v + \eta_2, \dots, 5)$. Необходимо определить дисперсии давлений в узлах сети.

Пусть $q_i(\omega)$, $i = (v + \eta_2, \dots, 5)$, $h_1^{(a)}(\omega)$ - независимые переменные, нормально распределённые, с известными математическими ожиданиями и дисперсиями.

Используя метод статистической линеаризации [11], вычисляем $\sigma_{h_i^{(c)}}$, $r = (v + \eta_2, \dots, 5)$. Систему уравнений (7) разложим в ряд Тейлора, ограничиваясь линейными членами ряда.

Расход на входе сети равен сумме расходов на выходах, т.е. $q_{0-1} = \sum_{i=v+\eta_2}^e q_i$, значит дисперсия расхода на входе равна:

$$\sigma_{q_{0-1}}^2 = \sum_{i=v+\eta_2}^e \sigma_{q_i}^2, \quad (10)$$

$$\sigma_{q_i}^2 = \sum_{r=v}^e b_{iri}^2 \sigma_{q_r}^2 = \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{iri}^2 \sigma_{q_r}^2 + \sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{iri}^2 \sigma_{q_r}^2, \quad (i=1, \dots, v-1). \quad (11)$$

Чтобы найти $\sigma_{q_r}^2$ при $v \geq 1,2$ м/с для $r = (v, \dots, v + \eta_2 - 1)$ выразим расход в реальных хордах через расход в ветвях дерева и расход в фиктивных хордах.

$$q_r = f_r(q_1, \dots, q_v, q_{v+\eta_2}, \dots, q_e). \quad (12)$$

$$T. \text{ к. } h_i(q_i) = S_i q_i |q_i| = q_i^2 \operatorname{sgn}(q_i) S_i(q_i), \quad (i=1, \dots, v-1), \quad (13)$$

$$\sigma_{h_i}^2 = \left(\frac{dh_i}{dq_i}\right)_m^2 \sigma_{q_i}^2 = \left(2q_i \operatorname{sgn}(q_i) S_i + q_i^2 \operatorname{sgn}(q_i) \frac{dS_i}{dq_i}\right)^2 \sigma_{q_i}^2. \quad (14)$$

Из формулы (7)

$$\begin{aligned} \sigma_{h_r^{(c)}}^2 &= \sigma_{h_1^{(a)}}^2 + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri}^2 \left(\frac{dh_i}{dq_i}\right)_m^2 \sigma_{q_i}^2 = \\ &= \sigma_{h_1^{(a)}}^2 + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri}^2 \left(2q_i \operatorname{sgn}(q_i) S_i + q_i^2 \operatorname{sgn}(q_i) \frac{dS_i}{dq_i}\right)^2 \sigma_{q_i}^2. \end{aligned} \quad (15)$$

Вычисляем $\frac{dS_i}{dq_i}$:

$$\begin{aligned} \text{при } v \geq 1,2 \text{ м/с } h &= 0,001736 \frac{1}{d^{5,3}} |q|q, \\ S &= 0,001736 \frac{1}{d^{5,3}}. \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{при } v < 1,2 \text{ м/с } h &= \frac{0,00148l}{d^{5,3}} \left(1 + \frac{0,688d^2}{q}\right)^{0,3} |q|q, \\ S &= \frac{0,00148l}{d^{5,3}} \left(1 + \frac{0,688d^2}{q}\right)^{0,3}. \end{aligned} \quad (17)$$

((16) – (17) - формулы Шевелева для неновых стальных и чугунных труб).

где l – длина участка водопроводной сети, d – диаметр трубы на участке.

$$\begin{aligned} \frac{dS_i}{dq_i} &= \frac{0,00148l_i}{d^{5,3}} \cdot 0,3 \cdot \left(1 + \frac{0,688d_i^2}{q_i}\right)^{-0,7} \cdot \left(-\frac{0,688d_i^2}{q_i^2}\right) \\ \text{при } v < 1,2 \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{dS_i}{dq_i} = 0 \quad \text{при } v \geq 1,2 \text{ м/с.} \quad (19)$$

Формулы расчёта давления в узлах:

$$h_r^{(c)} = h_1^{(a)} - \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri} (h_i + h_i^{(g)}), \quad r = (v + \eta_2, \dots, e). \quad (20)$$

Следовательно, при $v < 1,2$ м/с

$$\sigma_{h_i^{(e)}}^2 = \sigma_{h_i^{(0)}}^2 + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri}^2 \times$$

$$\times \left[2q_i \operatorname{sgn}(q_i) S_i + q_i^2 \operatorname{sgn}(q_i) \frac{0,001481}{d_i^{5,3}} \cdot 0,3 \times \right.$$

$$\left. \times \left(1 + \frac{0,688 d_i^2}{q_i} \right)^{-0,7} \cdot \left(-\frac{0,688 d_i^2}{q_i^2} \right) \right]^2 \cdot \sigma_{q_i}^2. \quad (21)$$

При $v \geq 1,2$ м/с

$$\sigma_{h_i^{(e)}}^2 = \sigma_{h_i^{(0)}}^2 + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri}^2 \left(\frac{dh_i}{dq_i} \right)_m^2 \sigma_{q_i}^2 =$$

$$= \sigma_{h_i^{(0)}}^2 + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri}^2 (2q_i \operatorname{sgn}(q_i) S_i)^2 \sigma_{q_i}^2. \quad (22)$$

Можно утверждать, что для линеаризованной системы (7) $h_i^{(c)}(\omega) \cong N(\bar{h}_i^{(c)}, \sigma_{h_i^{(c)}}^2)$, $i = (v + \eta_2, \dots, 5)$, так как $q_i(\omega) \cong N(\bar{q}_i, \sigma_{q_i}^2)$.

Зная $\sigma_{h_i^{(c)}}^2$, можно получить детерминированный эквивалент неравенства (9). Для этого находим новые значения минимально допустимых напоров $h_i^{(c)++}$, используя формулы:

$$P(h_i^{(c)+} \leq h_i^{(c)}(\omega) \leq h_i^{(c)++}) =$$

$$= \Phi \left(\frac{h_i^{(c)++} - \bar{h}_i^{(c)}}{\sigma_{h_i^{(c)}}} \right) - \Phi \left(\frac{h_i^{(c)+} - \bar{h}_i^{(c)}}{\sigma_{h_i^{(c)}}} \right) \cong 1,$$

$$i = (v + \eta_2, \dots, 5), \quad (23)$$

$$\Phi \left(\frac{h_i^{(c)++} - \bar{h}_i^{(c)}}{\sigma_{h_i^{(c)}}} \right) \cong 0,4,$$

$$\frac{h_i^{(c)++} - \bar{h}_i^{(c)}}{\sigma_{h_i^{(c)}}} \cong 1,29. \quad (24)$$

$$h_i^{(c)++} \cong \sigma_{h_i^{(c)}} \cdot 1,29 + \bar{h}_i^{(c)},$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа.

Тогда детерминированный эквивалент задачи (5 – 9) примет вид (25), (29) с ограничениями (26) – (28):

$$\sum_{i=v+\eta_2}^e \left(\bar{h}_i^{(c)} - h_i^{(c)++} \right) \rightarrow \min_{h_i^{(a)}}, \quad (25)$$

$$\operatorname{sgn} \bar{q}_r \bar{S}_r (\bar{q}_r) \bar{q}_r^2 + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri} \operatorname{sgn} \bar{q}_i \bar{S}_i (\bar{q}_i) \bar{q}_i^2 = 0,$$

$$(r = v, \dots, v + \eta_2 - 1), \quad (26)$$

$$\bar{h}_r^{(c)} - h_r^{(a)} + \sum_{i=1}^{v-1} b_{iri} (\operatorname{sgn} \bar{q}_i \bar{S}_i (\bar{q}_i) \bar{q}_i^2 + h_i^{(g)}) = 0,$$

$$r = (v + \eta_2, \dots, 5), \quad (27)$$

$$\bar{q}_i = \sum_{r=v}^{v+\eta_2-1} b_{iri} \bar{q}_r + \sum_{r=v+\eta_2}^e b_{iri} \bar{q}_r, \quad (i=1, \dots, v-1). \quad (28)$$

$$\bar{h}_i^{(c)} \geq h_i^{(c)++}, \quad i = (v + \eta_2, \dots, 5), \quad (29)$$

Задача (25) – (29) – задача нелинейного математического программирования специального вида. Её решение включает два этапа:

1. решение уравнений (26) – (28),
2. выбор $h_i^{(a)}$, при котором выполняется условие (29).

Система уравнений (26) – (28) – состоит из $(e-v+1)$ уравнений (26), (27) с $(e-v+1)$ неизвестными и $(v-1)$ уравнений связи (29). В результате решения системы (26) – (28) определяем величины $q_i, S_i, h_r^{(c)}$, $(i=1, \dots, v + \eta_2 - 1), r = (v + \eta_2, \dots, 5)$.

В результате решения задачи (25) находим давление активного источника $h_1^{(a)}$.

Задача (25) – (29) имеет единственное решение.

4. 4. Постановка задачи зонирования водопроводной сети

Разделение водопроводной сети на зоны применяется при значительной разности геодезических отметок обслуживаемых водопроводом участков, а также при значительной разнице свободных напоров, требуемых различным категориям потребителей с одинаковой этажностью застройки.

Те узлы водопроводной сети, в которых избыточные давления превышают заданное пороговое значение, необходимо сгруппировать в связанные участки (зоны) и предусмотреть установку регуляторов давления для каждой зоны.

Для каждой зоны необходимо выбрать регуляторы давления таким образом, чтобы минимизировать сумму избыточных давлений в зоне.

Рассмотрим случай, когда зона узлов с избыточным давлением изолирована, т. е. не имеет выходов потоков за исключением фиктивных хорд (конечных потребителей) и имеет два входа – рис. 1. Тогда для минимизации избыточных давлений по этой зоне необходимо на входах в зону (участок 1, 2) установить регуляторы давления «после себя». Из графа выделим связный подграф, во всех узлах которого избыточные давления превышают заданное пороговое значение. Эти узлы образуют множество P ($p = \operatorname{Card}(P)$). Чтобы определить параметры регуляторов давления, рассмотрим следующую задачу.

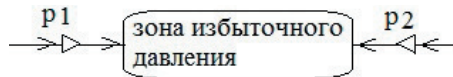


Рис. 1. Зона избыточного давления: p1, p2 – регуляторы давления на входах в зону

$$Z(h_1^{(a)}, h_2^{(a)}) = \sum_{r \in P} \left(\bar{h}_r^{(c)} - h_r^{(c)++} \right) \rightarrow \min_{h_1^{(a)}, h_2^{(a)}}, \quad (30)$$

$$\bar{h}_r^{(c)} \geq h_r^{(c)++}, \quad r \in P, \quad (31)$$

где $h_r^{(c)++}$ – минимальные допустимые давления в узлах зоны с учётом дисперсии давления регуляторов.

Задача (30), (31) – задача линейного программирования с неизвестными $h_1^{(a)}, h_2^{(a)}$.

4. 5. Задача распределения нагрузки между регуляторами давления, работающими на изолированную зону

Задача (30), (31) примет вид:

$$Z(h_1^{(a)}) = \sum_{r \in P} (\bar{h}_r^{(c)} - h_r^{(c++)}) = \sum_{r \in P} (h_1^{(a)} - (\bar{h}_{1a} + h_{1a}^{(g)})) - \sum_i b_{1ri} (\bar{h}_i + h_i^{(g)}) - \bar{h}_r^{(c++)} \rightarrow \min_{h_1^{(a)}} \quad (32)$$

где i – дуги выделенной зоны, $\bar{h}_{1a}, h_{1a}^{(g)}$ - потери напора и геодезические отметки от регулятора давления №1 до выделенной зоны. $b_{1ri} = 1$, если поток направлен от активного источника (регулятора давления), $b_{1ri} = -1$, если поток направлен к активному источнику (регулятору давления).

Ограничения $\bar{h}_r^{(c)} \geq h_r^{(c++)}$, $r \in P$ перепишем:

$$\begin{cases} h_1^{(a)} \geq h_r^{(c++)} + (\bar{h}_{1a} + h_{1a}^{(g)}) + \sum_i b_{1ri} (\bar{h}_i + h_i^{(g)}), & r \in P. \\ h_2^{(a)} = h_1^{(a)} + \sum_i b_{1ri} (\bar{h}_i + h_i^{(g)}) + (\bar{h}_{1a} + h_{1a}^{(g)}) + (\bar{h}_{2a} + h_{2a}^{(g)}). \end{cases} \quad (33)$$

Получили задачу линейного программирования (32), (33) с двумя переменными $h_1^{(a)}, h_2^{(a)}$, которая решается симплекс методом.

5. Апробация результатов исследования

Пример:

Рассмотрим участок водопроводной сети с одной насосной станцией, установленной на участке 0 – 1.

Граф водопроводной сети представлен на рис. 2, параметры сети в табл. 1.

Известны также: давление на входе $h_1^{(a)} = 52,6$; дисперсия давления на входе $D(h_1^{(a)}) = 81$, $\sigma(h_1^{(a)}) = 9$; расходы на выходе (посчитаны ранее) q_0 – 2 столбец в табл. 2 и их дисперсия – 6 столбец в табл. 2.

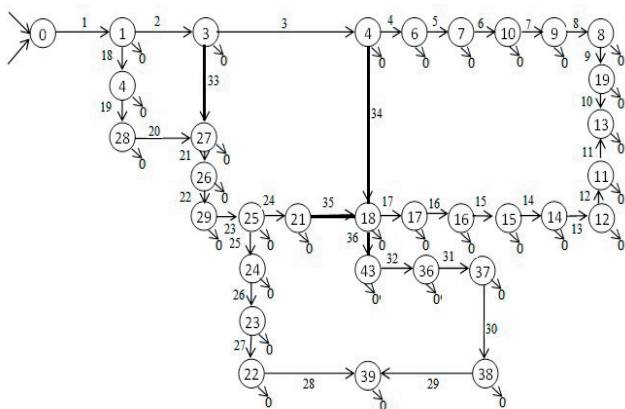


Рис. 2. Граф водопроводной сети

Необходимо осуществить зонирование водопроводной сети, если это необходимо.

Результаты решения задачи (25) – (29) в табл. 2 $h^{(c++)}$ - новое минимальное допустимое давление в узлах сети; в столбцах 8 – 10 – данные с учетом дисперсии давлений в узлах сети.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчётов задачи установившегося потокораспределения в водопроводной сети

№ дуги	узловая пара	h, м	v, м/с	l, м	d, м	dh, м	q, м³/с	S, с²/м⁵
1	0-1	52,621	1,60	0	0,8	0	0,805	0
2	1-3	0,497	0,83	478	0,8	0,79	0,416	2,866
3	3-4	0,649	0,63	1036	0,8	1,19	0,316	6,501
4	4-6	0,385	0,52	600	0,6	1,02	0,147	17,913
5	6-7	0,125	0,26	686	0,6	-3,45	0,073	23,762
6	7-10	0,06	0,13	1693	0,8	4,42	0,063	15,282
7	10-9	1,672	0,65	566	0,25	-0,27	0,032	1683,128
8	9-8	0,323	0,42	302	0,3	-1,3	0,03	370,554
9	8-19	0,383	0,35	500	0,3	-2,25	0,025	637,781
10	13-19	0,134	0,20	442	0,3	1,41	0,014	636,198
11	11-13	0,145	0,25	313	0,3	1,32	0,018	425,202
12	12-11	0,275	0,30	454	0,3	-0,66	0,021	596,054
13	14-12	0,316	0,33	445	0,3	1,67	0,023	572,904
14	15-14	0,36	0,34	471	0,3	1,65	0,024	600,934
15	16-15	0,898	0,40	895	0,3	0,52	0,028	1106,142
16	17-16	0,368	0,45	290	0,3	-3,96	0,032	349,066
17	18-17	0,28	0,47	209	0,3	-3,1	0,033	250,08
18	1-40	0,195	0,69	181	0,6	0,28	0,195	5,137
19	40-28	0,155	0,56	212	0,6	-4,23	0,158	6,243
20	28-27	0,149	0,37	432	0,6	-0,74	0,104	13,821
21	27-26	0,111	0,34	375	0,6	1,15	0,095	12,221
22	26-29	0,154	0,44	250	0,5	2,63	0,087	20,214
23	29-25	0,431	0,64	266	0,4	2,48	0,081	65,45
24	25-21	0,091	0,25	300	0,4	-0,14	0,032	89,355
25	25-24	0,566	0,68	217	0,3	-0,25	0,048	242,939
26	24-23	0,519	0,65	215	0,3	-2,99	0,046	242,439
27	23-22	0,652	0,61	305	0,3	-2,97	0,043	347,961
28	22-39	1,733	0,59	671	0,25	4,53	0,029	2021,282
29	38-39	0,0712	0,50	497	0,3	6,51	0,035	590,55
30	37-38	1,004	0,58	525	0,3	-2,45	0,041	605,533
31	36-37	0,647	0,65	274	0,3	-3,07	0,046	309,625
32	43-36	0,744	0,79	219	0,3	-1,3	0,056	239,514
33	3-27	0,002	0,03	400	0,6	-5,48	0,0085	24,69
34	4-18	0,17	0,30	700	0,6	-0,069	0,0853	23,364
35	21-18	0,031	0,13	350	0,4	-0,14	0,0159	123,982
36	18-43	0,243	0,53	214	0,4	-1,1	0,0667	54,542

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчётов задачи оперативного планирования водопроводной сети

№ узла	$q_0, \text{ м}^3/\text{с}$	$h^{(c)+}, \text{ м}$	$h^{(c)}, \text{ м}$	$h_{\text{изб}}, \text{ м}$	σ_{q_0}	$\sigma_{h^{(c)}}$	$h^{(c)++}, \text{ м}$	$h^{(c)*}, \text{ м}$	$h_{\text{изб}*}, \text{ м}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,194	52,6	52,621	-	0,03233	-	-	-	-
3	0,092	51,309	51,334	0,025	0,01533	9,0005	62,919	63,07584	0,156193
4	0,084	49,464	49,496	0,032	0,014	9,0009	61,075	61,23684	0,161677
6	0,074	48,048	48,101	0,053	0,01233	9,0022	59,660	59,84184	0,181
7	0,01	51,368	55,976	4,608	0,00167	9,0027	62,981	67,71684	4,735355
10	0,031	46,887	60,916	14,029	0,00517	9,0028	58,500	72,65684	14,156226
9	0,002	45,432	61,245	15,813	0,00033	9,443	57,61	72,98484	15,371368
8	0,005	46,401	58,922	12,521	0,00083	9,4607	58,605	70,66184	12,056535
19	0,039	48,281	57,539	9,258	0,0065	9,4962	60,531	69,27884	8,74774
13	0,004	49,835	56,672	6,837	0,00067	9,5075	62,099	68,41284	6,313163
11	0,003	51,304	60,558	9,254	0,0005	9,5159	63,579	72,29784	8,718327
12	0,002	50,919	65,833	14,914	0,00033	9,5382	63,223	77,57284	14,34956
14	0,001	52,915	59,739	6,824	0,00017	9,5629	65,251	71,47884	6,227697
15	0,004	54,946	61,749	6,803	0,00067	9,5925	67,320	73,48884	6,168513
16	0,004	56,379	63,167	6,788	0,00067	9,7283	68,928	74,90684	5,978331
17	0,001	52,8	59,575	6,775	0,00017	9,7459	65,372	71,31484	5,942627
18	0,001	49,986	56,756	6,77	0,00017	9,7555	62,570	68,49484	5,924243
40	0,037	52,124	52,146	0,022	0,00617	9,0003	63,734	63,88784	0,153451
28	0,054	56,198	56,221	0,023	0,009	9,0006	67,808	67,96284	0,154064
27	0,017	56,783	56,812	0,029	0,00283	9,0011	68,394	68,55384	0,159419
26	0,008	55,526	55,552	0,026	0,00133	9,0012	67,137	67,29284	0,15529
29	0,006	52,74	52,768	0,028	0,001	9,0012	64,351	64,50884	0,15729
24	0,002	49,5	49,541	0,041	0,00033	9,0056	61,117	61,28184	0,164614
23	0,003	51,568	52,012	0,444	0,0005	9,0088	63,189	63,75284	0,563486
22	0,014	54,288	54,33	0,042	0,00233	9,0145	65,916	66,07084	0,154133
39	0,064	48,063	48,066	0,003	0,01067	9,099	59,80	59,80784	0,007128
38	0,006	55,277	55,288	0,011	0,001	9,1004	67,016	67,02984	0,013322
37	0,005	53,842	53,842	0	0,00083	9,1022	65,583	65,58384	0
36	0,01	51,418	51,419	0,001	0,00167	9,1028	63,160	63,16084	0,000226
43	0,011	50,848	50,863	0,015	0,00183	9,1033	62,591	62,60484	0,013581
25	0,001	49,825	49,857	0,032	0,00017	9,0021	61,437	61,59784	0,160129
21	0,016	49,876	49,907	0,031	0,00267	9,0021	61,488	61,64684	0,158129

В рассматриваемой водопроводной сети была выделена зона - связный подграф, включающий в себя участки сети и узлы, избыточное давления в которых превышает заданное пороговое значение $h_{\text{изб}} > 6$. Узлы зоны: 10, 9, 8, 19, 13, 11, 12, 14, 15 – рис. 3.

Произведем расчёт дисперсий давлений в узлах зоны, считая, что дисперсия давления регулятора дав-

ления $\sigma_{h^{(c)}} = 0,1$. Получим новые значения минимальных допустимых напоров в узлах зоны h^{++} и значения давлений в узлах зоны $h^{(c)*}$.

Для выделенной зоны необходимо рассчитать давления регуляторов на входах в зону так, чтобы сумма избыточных давлений в узлах зоны была минимальной.

Сумма избыточных давлений по всей сети $\sum h_{изб} = 117,2$; по выбранной зоне $\sum h_{изб} = 81,87$.

Исходные данные и результаты – в табл. 3 столбцы 5 – 7 – результаты после учёта дисперсии давлений в узлах; столбцы 8, 9 – результаты с учётом регуляторов давлений на входах в зону.

Таблица 3

Исходные данные и результаты расчётов задачи зонирования и задачи распределения нагрузки между регуляторами давления, работающими на изолированную зону водопроводной сети

Узлы	h_i	dh	Узел	$h_{md} = h^{(c)++}$	$h^{(c)*}$	$h_{изб}^*$	$h^{(c)**}$	$h_{изб}^{**}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7-10	0,06	-5	10	58,63	72,66	14,03	67,66	9,03
10-9	1,672	-2	9	58,88	72,98	14,11	67,99	9,11
9-8	0,323	2	8	59,89	70,66	10,77	65,67	5,77
8-19	0,383	1	19	61,87	69,28	7,41	64,28	2,41
13-19	0,134	-1	13	63,42	68,41	5,00	63,42	0,00
11-13	0,145	3,74	11	64,88	72,30	7,42	67,30	2,42
12-11	0,275	5	12	64,48	77,57	13,09	72,58	8,10
14-12	0,316	-6,41	14	66,45	71,48	5,02	66,48	0,03
15-14	0,36	1,65	15	68,46	73,49	5,03	68,49	0,04
16-15	0,898	0,52	-	-	-	-	-	-

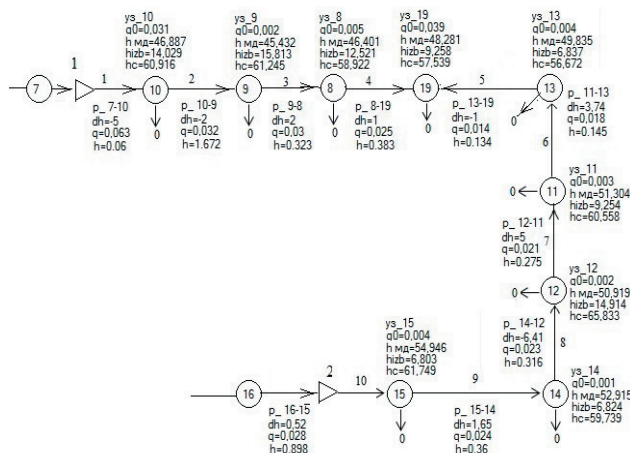


Рис. 3. Зона узлов с избыточным давлением, превышающим пороговое значение

После решения задачи минимизации суммы избыточных давлений по зоне получили:

1. $\sum h_{изб} = 36,91$ (по зоне).

6. Выводы

В данной работе разработан метод реинжиниринга водопроводных сетей путём их зонирования и установки регуляторов давления, реализация которого обеспечивает существенное снижение суммарных избыточных давлений в узлах водопроводной сети, объёмов утечек воды и экономию материальных и энергетических ресурсов.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые предложен усовершенствованный метод зонирования водопроводной сети на основе стохастической модели квазистационарных режимов в системах подачи и распределения воды, которые учитывают как стохастическую природу основных возмущающих факторов водопроводных систем – процессов потребления воды, так и стохастическую природу параметров математических моделей, и позволяют более адекватно описывать фактические режимы работы водопроводных систем.

Практическая значимость заключается в том, что стохастическая модель позволяет получить верхнюю и нижнюю оценки диапазонов изменения параметров потоков воды в любом узле водопроводной сети для заданного уровня внешних стохастических возмущений.

Эти данные позволяют рассчитать оптимальные параметры регуляторов давления для каждой из выделенных зон.

Например, для рассмотренного примера в результате применения усовершенствованного метода зонирования суммарное избыточное давление по сети снизилось на 38,36 %.

Ограничения: в данном исследовании рассматривалась изолированная зона узлов с избыточным давлением (не имеющая выходов потоков за исключением конечных потребителей) с двумя входами. Для 3-х и более входов задача решается аналогично.

Для улучшения полученных результатов и усовершенствования метода реинжиниринга водопроводных сетей дальнейшие исследования необходимо направить на разработку методов многоуровневого зонирования, анализ режимов работы регуляторов давления, решение задачи минимизации количества регуляторов давления.

Литература

1. Абрамов, Н. Н. Водоснабжение [Текст] / Н. Н. Абрамов. – М. ; Стройиздат, 1974. – 481 с.
2. Burgschweiger, J. Nonlinear Programming Techniques for Operative Planning in Large Drinking Water Networks [Text] / J. Burgschweiger, B. Bernd Gnadig, M. C. Steinbach // Konrad-Zuse-Zentrum fur Informationstechnik. – Berlin, ZIB-Report, 2005.
3. Burgschweiger, J. Optimization Models for Operative Planning in Drinking Water Networks [Text] / J. Burgschweiger, B. Bernd Gnadig, M. C. Steinbach // Konrad-Zuse-Zentrum fur Informationstechnik. – Berlin, ZIB-Report, 2004.

4. Steinbach, M. C. Hierarchical Sparsity in Multistage Convex Stochastic Programs [Text] / M. C. Steinbach // Konrad-Zuse-Zentrum fur Informationstechnik. - Berlin, ZIB-Report, 2000.
5. Steinbach, M. C. Tree-Sparse Convex Programs [Text] / M. C. Steinbach // Konrad-Zuse-Zentrum fur Informationstechnik. - Berlin, ZIB-Report, 2001.
6. Hovee, W.-J. Operations Research Techniques in Constraint Programming [Text] / W.-J. Hovee // Institute for Logic, Language and Computation Universiteit van Amsterdam, 2005. - 154 p.
7. Steinbach, M. C. General Information Constraints in Stochastic Programs [Text] / M. C. Steinbach. // Berlin, ZIB, 2001.
8. Евдокимов, А. Г. Потокораспределение в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, В. В. Дубровский, А. Д. Тевяшев. - М. : Стройиздат, 1979. - 199 с.
9. Евдокимов, А. Г. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях [Текст] / А. Г. Евдокимов, А. Д. Тевяшев. - Харьков. : Вища школа, 1980. - 144 с.
10. Тевяшев, А. Д. Применение линеаризованных моделей установившегося потокораспределения в задачах оперативного управления [Текст] / А. Д. Тевяшев, С. И. Козыренко // Новые информационные технологии управления развитием и функционированием трубопроводных систем энергетики, 1993. - С. 20 - 33.
11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. - М. : Наука, 1969. - 564 с.

Розглянуто новий підхід до обробки даних медико-біологічних досліджень з використанням методів обчислювального інтелекту. Особливістю цього підходу є нечутливість методу до співвідношення кількості об'єктів до кількості показників, що ці об'єкти характеризують і нечутливість до закону розподілу даних. Запропонований підхід дозволяє проводити обробку даних при задалегідь відомій і невідомій кількості об'єктів

Ключові слова: обчислювальний інтелект, нейронна мережа, кластер, центроїд, ступінь належності

Рассмотрен новый подход к обработке данных медико-биологических исследований с использованием методов вычислительного интеллекта. Особенностью этого подхода является то, что метод не чувствителен к соотношению количества объектов к количеству характеризующих эти объекты показателей и нечувствителен к закону распределения данных. Предложенный подход подразумевает обработку данных при заранее известном и неизвестном количестве объектов

Ключевые слова: вычислительный интеллект, нейронная сеть, кластер, центроид, степень принадлежности

УДК 615.471:616-071

АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА ДАНЫХ МЕДИКО- БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

И. Г. Перова

Кандидат технических наук,
старший преподавательКафедра биомедицинской инженерии
Харьковский национальный университет
радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166
E-mail: churyumova@mail.ru

1. Введение

Применение в медицинской диагностике интеллектуальных методов обработки данных в настоящее время получило широкое распространение. Это объясняется необходимостью оказания помощи врачу на этапе анализа количественной, а также правильно интерпретированной качественной информации о состоянии пациента. Практически любое серьезное исследование в настоящее время сопровождается сложными математическими вычислениями и анализом. Именно по этой причине предлагается метод адаптивной обработки данных медико-биологических исследований на осно-

ве методов вычислительного интеллекта, состоящий из этапа предварительной обработки, этапа компрессии данных и этапа разделения на однородные группы, так называемого этапа кластеризации данных.

2. Постановка проблемы

К настоящему времени существует большое количество методов разделения области данных на однородные группы. Эти методы могут работать, основываясь на информации, полученной из обучающей выборки либо без наличия таковой, так называемые