

формуле  $i = A/t^n$  получим соответственно:  $i = 154, 67, 91,5$  л/с·га (при этом принято:  $A = 863, n = 0,75$ ). Соотношение между определяемыми расходами (при неизменности коэффициента стока) составит 2,33:1:1,37.

Таким образом, учет эффекта от смещения дождя в некоторых климатических районах может привести к существенному уточнению расходов воды и размеров сечения дождевой канализации. Однако для этого предварительно необходимо изучить закономерности смещения дождей и разработать новую методику расчета стока.

### Л и т е р а т у р а

1. Зброжек Ф.Г. Сток атмосферных осадков. - Журнал министерства путей сообщения. Кн. 8 и 9. - С-Пб., 1901.
2. Долгов Н.Е. Основные положения теории стока ливневых вод. - Гидрологический вестник. - Петроград, 1916, №1.
3. Костяков А.Н. Основы мелиорации. - М. - Л., 1933.
4. Великанов М.А. Гидрология суши. - М., 1932.
5. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока. - Тр. Одесск. гидрометеоролог. ин-та, вып. 14, ч. 2, 1958.
6. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л., 1965.
7. Хромов С.П. Основы синоптической метеорологии. - Л., 1948.
8. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. - Л., 1957.
9. Кричок О.Г. Синоптическая метеорология. - Л., 1956.
10. Кирюхин Б.В., Красиков П.Н. Облака, дождь и снег. - Л., 1953.
11. Материалы наблюдений Прибалтийской стоковой станции. - Латв. УГМС, 1964, 1966, 1968.
12. Hershfield David M. Some small. Scalle characteristics of extreme storm rainfalls in Small bosins. - Hydrol. sei Ball. 1975, 20 N1, 77 - 85.

УДК 628.143.001.2

В.П.Старинский, докт. техн. наук, доц. (БПИ)

### ПРИНЦИПЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В КОЛЬЦЕВЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

Известно, что в процессе проектирования и гидравлического расчета кольцевых водопроводных сетей постоянно приходится решать задачи, в которых число искомых неизвестных в два раза превышает число возможных к использованию расчетных уравнений [1]. Например, чтобы произвести гидравличес-

кий расчет сети, необходимо найти такие расходы и диаметры ее линий, при которых одновременно для всех узлов и элементарных контуров (колец сети) удовлетворяются оба закона Кирхгофа. Это значит, что для сети, состоящей из  $p$  элементов, необходимо найти  $2p$  неизвестных ( $Q_{ij}$   $d_{ij}$ ) при использовании для этих целей  $p$  расчетных уравнений вида

$$P_i \sum_{j=1}^p Q_{ij} + Q_{yi} + Q_{ci} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m-1); \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^p \Delta h_{kl} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

где  $Q_{ij}$  расходы воды в соединяющих рассматриваемые узлы линиях;  $m$  - число узлов в сети;  $Q_{yi}$  и  $Q_{ci}$  - соответственно узловые и сосредоточенные отборы воды в узлах сети;  $\Delta h_{kl}$  - потери напора в отдельных линиях сети;  $n$  - число рассматриваемых элементарных контуров в сети.

Естественно, решение таких задач возможно при условии, если предварительно задаться частью, а в рассматриваемом случае половиной этих неизвестных. В практике обычно задаются расходами воды, выбирая предварительное потокораспределение в сети. При этом стремятся к тому, чтобы при принятом потокораспределении в сети подача воды всем ее потребителям осуществлялась с необходимой расчетной надежностью и минимально возможными в данных условиях приведенными затратами. Теоретическое решение этой задачи отсутствует. Поэтому практический интерес представляет выявление хотя бы основных научно обоснованных принципов распределения воды в кольцевых водопроводных сетях.

Если водопроводная сеть состоит из  $p$  элементов и из  $z$  точек питания обеспечивает подачу воды в  $m$  ее узлов с узловыми отборами  $Q_{yi}$  и  $Q_{ci}$ , то условие минимума зависящей от принятого потокораспределения части приведенных затрат на подачу воды потребителям можно представить в виде

$$\sum_1^z \left( E + \frac{Pbz}{100} \right) \sum_1^p z (a_z + b_z d_{ijz}^z) l_{ijz} +$$

$$+ \psi \sum_1^z T_z \gamma_z \sum_1^p \frac{s_{oijz} l_{ijz} Q_{ijz}^3}{\eta_z} = \min. \quad (3)$$

$$\text{При} \quad \sum_{i=1}^m (Q_{yi} + Q_{ci}) - \sum_1^z Q_{nz} = 0, \quad (4)$$

где  $E$  – коэффициент эффективности капиталовложений в водоснабжение;  $p_{bz}$  – общий процент амортизационных отчислений от стоимости водопроводных линий отдельных зон сети;  $a_z$  и  $b_z$  – параметры экономической характеристики водопроводных линий для отдельных зон сети;  $\alpha_z$  – показатель степени этой же характеристики;  $d_{ijz}$  – диаметры отдельных линий сети, расположенных в ее характерных зонах;  $l_{ijz}$  – длина этих линий;  $\Psi$  – коэффициент размерности, равный 9, 81 при представлении величин  $s_{oijz}$ ,  $l_{ijz}$  и  $Q_{ijz}$  метровой размерностью;  $\sigma$  – стоимость 1 кВт·ч потребленной энергии;  $T_z$  – продолжительность работы сети в году (8760 ч);  $\gamma_z$  – коэффициент использования расчетной пропускной способности сети в году;  $s_{oijz}$  – коэффициент удельного гидравлического сопротивления линий водопроводной сети;  $\eta_z$  – КПД насосного оборудования, используемого для подачи воды в отдельные зоны сети;  $Q_{ijz}$  – расходы воды, протекающие по отдельным водопроводным линиям;  $Q_{yi}$ ,  $Q_{ci}$  – узловые отборы воды в сети;  $Q_{nz}$  – подачи воды в отдельные зоны сети;  $z$  – число точек питания сети;  $p_z$  – количество элементов в зоне сети.

Первый член выражения (3) представляет собой ту часть зависящих от  $Q_{ijz}$  приведенных затрат сети, которая определяется ее строительной стоимостью. При этом зависимость этой части затрат от  $Q_{ijz}$  представлена через соответствующие им диаметры линий  $d_{ijz}$ .

Второй член этого же выражения характеризует собой ту зависящую от  $Q_{ijz}$  часть приведенных затрат, которая определяется эксплуатационными расходами, и в частности расходами на оплату затрачиваемой электроэнергии.

Выражение (4) является дополнением к выражению (3) и определяет необходимые условия работы сети. В частности, (4) обуславливает необходимость соблюдения баланса расходов воды в рассматриваемой сети при заданных расчетных подачах и отборах из нее воды.

Если в соответствии с [2] величины  $s_{oijz}$  представить как  $s_{cijz} = c_z \cdot d_{ijz}^m$ , а  $d_{ijz}$  выразить через  $\Theta_z$ ,  $Q_{nz}$  и

$$Q_{ijz} \text{ по формуле Л.Ф.Мошнина } d_{ijz} = \Theta_z^{\frac{1}{\alpha+m}} \cdot Q_{nz}^{\frac{1}{\alpha+m}} \cdot Q_{ijz}^{\frac{\beta}{\alpha+m}}$$

то зависимость (3) получит вид

$$F(Q_{ijz}) = \sum_1^z \left( E + \frac{P_{bz}}{100} \right) \sum_1^z \left( a_z + b_z \vartheta_z^{\frac{1}{\alpha+m}} Q_{nz}^{\frac{1}{\alpha+m}} Q_{ijz}^{\frac{\beta}{\alpha+m}} \right)^{1+\frac{1}{\alpha+m}} + \psi \sigma \sum_1^z T_z \gamma_z \cdot \sum_1^z \frac{P_z c_z l_{ijz} Q_{ijz}^3}{\eta_z \vartheta_z^{\frac{1}{\alpha+m}} Q_{nz}^{\frac{1}{\alpha+m}} Q_{ijz}^{\frac{\beta}{\alpha+m}}} = \min, \quad (5)$$

где  $m$  - показатель степени при  $d_{ijz}$ , зависящий от типа применяемых труб;  $\beta$  - показатель степени при  $v_{ijz}$  и  $Q_{ijz}$  в формуле для определения потерь напора в трубах, зависящий также от вида применяемых труб. Остальные величины прежние.

Из зависимости (5), как из функции цели многих переменных, найдем условия, при которых распределение расходов воды по элементам сети будет оптимальным. Для этого возьмем от этой функции частные производные по искомым  $Q_{ijz}$  и из условия Эйлера приравняем их к нулю. Тогда получим систему расчетных уравнений

$$\frac{\alpha \beta}{\alpha+m} \left( E + \frac{P_{bz}}{100} \right) b_z \vartheta_z^{\frac{\alpha}{\alpha+m}} Q_{nz}^{\frac{\alpha}{\alpha+m}} Q_{ijz}^{\frac{\alpha \beta}{\alpha+m}} - 1 + \quad (6)$$

$$+ \left( 3 - \frac{m\beta}{\alpha+m} \right) \frac{\psi \sigma T_z \gamma_z c_z}{\eta_z \vartheta_z^{\frac{m}{\alpha+m}} Q_{nz}^{\frac{m}{\alpha+m}}} \cdot Q_{ijz}^{2 - \frac{m\beta}{\alpha+m}} = 0$$

$$\left( \sum_1^z P_z - \text{уравнений} \right).$$

Из полученной системы следует, что оптимальные величины расходов в сети равны

$$Q_{ijz} = \left[ \frac{\frac{\alpha \beta}{\alpha+m} \left( E + \frac{P_{bz}}{100} \right) b_z \vartheta_z Q_{nz}}{\left( 3 - \frac{m\beta}{\alpha+m} \right) \psi \sigma T_z \gamma_z c_z} \right]^{\frac{1}{3-\beta}} \quad (7)$$

Поскольку  $\beta \approx 2,0$ , оптимальное потокораспределение в сети можно представить выражением вида

$$Q_{ijz} = \frac{\frac{\alpha\beta}{\beta+m} \left( E + \frac{P_{bz}}{100} \right) b_z \varepsilon_z}{\left( 3 \frac{m\beta}{\alpha+m} \right) \psi \sigma T_z \delta_z c_z} Q_{nz} \quad (8)$$

Как показывает анализ выражения (8), величина дроби, стоящей перед  $Q_{nz}$ , близка к единице. Поэтому из экономических соображений потоки воды в сети необходимо не рассредоточивать по ее линиям, а концентрировать по одному из главных направлений, передавая их по кратчайшему пути от точки питания к центру водоразбора.

К этому же выводу можно прийти и на основе данных, полученных автором при рассмотрении оптимального числа ниток водоводов [3]. Но концентрация расходов воды по одному из направлений сети серьезно нарушает требования надежности водообеспечения ее потребителей, так как при выходе даже одного участка линий из этого направления наблюдается существенное снижение подачи воды по остальным линиям сети вследствие ограничения их пропускной способности. Особенно тяжелое положение с надежностью водообеспечения потребителей складывается в том случае, когда выходит из строя одна из таких линий, примыкающих непосредственно к точкам питания сети. Вот почему вопросам загрузки этих линий необходимо уделять особое внимание. В частности, распределение потоков воды по отводящим от узлов линиям сети должно приниматься таким образом, чтобы при аварийном выходе из строя одного из участков наиболее загруженной линии оставшиеся в работе линии узла смогли отвести и подать ниже расположенным потребителям требуемое по условиям нормативной надежности водоснабжения количество воды. Например, в сетях хозяйственно-питьевых систем водоснабжения принятое предварительное потокораспределение при аварийном выходе из строя одного из элементов, согласно [4], должно приводить к снижению подачи воды по остальным линиям не более чем на 30 - 50% (в зависимости от числа точек питания сети), а общее снижение подачи воды в сеть не должно превышать 30%. В особо "неблагоприятных" местах снижение подачи воды по отдельным линиям сети допускается принимать предельно до 75% от расчетного. При этом свободный напор здесь не должен падать ниже 10 м.

Чтобы выполнить эти требования, загрузку отходящих от точек питания линий принимают из условия эквивалентности пропускной способности наиболее загруженной и всех остальных отводящих линий узла. Так, если от точки питания сети отходят две отводящие линии, то независимо от того, каким образом производится дальнейшее распределение воды в сети, загрузку этих линий принимают примерно одинаковой. Это позволяет одинаково обеспечивать требуемую надежность подачи воды потребителям при аварийном выходе любой из них из строя.

Если же от точки питания отходят три и более водоотводящие линии, то требования к назначению их загрузки, с точки зрения надежности водоснабжения потребителей, снижаются. В этом случае она может приниматься исходя из экономических соображений. Однако и тогда принцип эквивалентности пропускной способности наиболее загруженной и остальных линий узла должен сохраняться. Причем, чем большее число отводящих линий в узле, тем легче удовлетворяются эти требования и тем проще решается задача выбора первоначального потокораспределения в сети, и наоборот. Аналогичное влияние на выбор загрузки отводящих линий оказывает и место расположения узла в сети: чем дальше узел находится от точки питания сети, тем больше свободы в выборе загрузки его отводящих линий, и наоборот.

Для удаленных от точки питания узлов загрузку их отводящих линий целесообразно назначать исходя из местной специфики, например из возможных по топографическим условиям местности и этажности ее жилой застройки гидравлических уклонов пьезометрических линий сети. Из [5] известно, что между диаметром водопроводных линий, их пропускной способностью и экономически наиболее выгодным гидравлическим уклоном существует вполне определенная взаимосвязь. Она, как показывает выполненный автором анализ приведенных в [5] данных по  $d$ ,  $Q$  и  $I_{\text{эк, ср}}$  для широко используемых в водоснабжении основных типов труб, может быть представлена кривыми рис. 1. Эти кривые с достаточной для практики точностью можно аппроксимировать выражением вида

$$I_{\text{эк}} = I_0 - c \cdot Q^n \quad (9)$$

где  $I_{\text{эк}}$  — экономически допустимый в данных условиях гидравлический уклон линии;  $I_0$  — средний экономический уклон линии при  $Q$ , близком к нулю;  $c$  — коэффициент пропорцио-

нальности;  $\varepsilon$  – экономический фактор;  $Q$  – расход воды в линии;  $n$  – показатель степени при  $Q$ .

Для основных видов применяемых в водоснабжении труб значения  $I_0$ ,  $c$  и  $n$  рекомендуется принимать в соответствии с данными табл. 1.

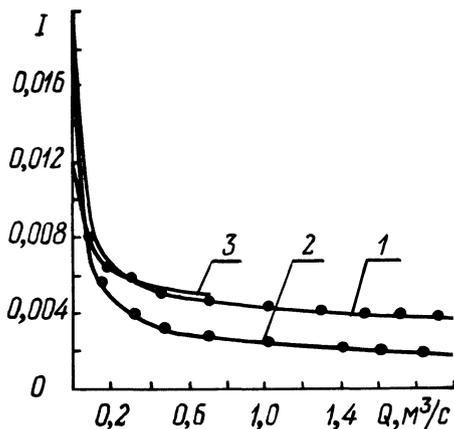


Рис. 1. Кривые зависимости экономически наивыгоднейшего гидравлического уклона в водопроводных линиях от их производительности:

1 – чугунные; 2 – стальные и 3 – асбестоцементные трубы.

Таблица 1. Значения параметров, определяющих  $I_{\text{эк}}$

Тип используемых труб	$I_0$	$c$	$n$
Чугунные	0,0200	0,0200	0,125
Стальные	0,0200	0,0237	0,125
Асбестоцементные	0,0135	0,0120	0,200

Из выражения (9) можно найти, что при известных  $I_i$  экономически наиболее целесообразная загрузка водопроводных линий сети будет равна

$$Q_{ij} = \left( \frac{I_0 - I_{ij}}{c\varepsilon} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{I_0 - \frac{P_i - P_{ij}}{l_{ij}}}{c} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad (10)$$

где  $I_{ij}$  – гидравлический уклон рассматриваемой линии;  $P_i$  и  $P_{ij}$  – пьезометры в начале и конце нее;  $l_{ij}$  – длина линии.

Таким образом, принимаемое предварительное потокораспределение в сети одновременно должно учитывать как экономические, так и другие факторы и в первую очередь определяющие надежность подачи воды потребителям. Такой учет достигается путем последовательного рассмотрения баланса расходов воды в узлах сети, начиная из точек их питания. При этом отво-

димый от узла и распределяемый между его отводящими линиями расход воды находится следующим образом:

$$Q_{\text{отв.}} = \sum Q_{\text{пр.}i} - Q_{y_i} - Q_{c_i}, \quad (11)$$

где  $\sum Q_{\text{пр.}i}$  - сумма притекающих расходов воды к рассматриваемому  $i$ -му узлу сети;  $Q_{y_i}$  и  $Q_{c_i}$  - соответственно узловой и сосредоточенный расход этого узла. Для точек питания сети  $\sum Q_{\text{пр.}i}$  равна величине подачи воды в эти точки насосами или башнями.

Распределение отводимого от узла расхода воды между его отводящими линиями определяется по формуле

$$Q_{ij} = K_{ij} Q_{\text{отв.}i}, \quad (12)$$

где  $K_{ij}$  - коэффициент распределения отводимого от узла расхода воды между его отводящими линиями. Значения этих коэффициентов принимают исходя из изложенных выше принципов рационального потокораспределения сети. При этом в каждом узле сети сумма коэффициентов распределения отводимых от узлов расходов обязательно должна быть равна единице:

$$\sum K_{ij} = 1. \quad (13)$$

Когда по условиям топографии местности, этажности застройки и другим аналогичным показателям территории рассматриваемого объекта можно предварительно наметить рациональные уклоны пьезометрических линий в сети, значения коэффициентов распределения расходов для отводящих линий можно определить по формуле

$$K_{ij} = \frac{(I_o - I_{ij}) \frac{1}{n}}{\sum_{j=1}^p (I_o - I_{ij}) \frac{1}{n}} = \frac{(I_o - \frac{P_i - P_j}{l_{ij}}) \frac{1}{n}}{\sum_{j=1}^p (I_o - \frac{P_i - P_j}{l_{ij}}) \frac{1}{n}}. \quad (14)$$

Отводимые от узлов водоотводящими линиями расходы воды принимаются положительными и передаются в нижерасположенные по движению воды соседние узлы с противоположными знаками, так как здесь они выступают уже в качестве расходов питания узлов. Узлы, для которых в соответствии с (11) общий отводимый расход воды получает нулевое или отрицательное значение, являются принадлежащими линиям встречи потоков или расположенными в конечной точке сети.

Изложенное поясним на примере. Пусть нам необходимо наметить предварительное потокораспределение в сети, представленной по рис. 2. Согласно схеме этой сети, отводимой от узла 1 (от точки питания сети), расход воды составляет величину  $Q_{отв1} = Q_{n1} - Q_{y} - Q_{c1}$ . Распределение его

трем ствоящим от узла воду линиями (1-2, 1-3 и 1-4) произведем пропорционально их коэффициентам распределения:  $K_{1,2} = 0,20$ ,  $K_{1,3} = 0,45$  и  $K_{1,4} = 0,35$  ( $\sum K_{ij} = 0,2 + 0,45 + 0,35 = 1$ ). Тогда  $Q_{12} = 0,20 Q_{отв1}$ ,  $Q_{13} = 0,45 Q_{отв.2}$  и  $Q_{14} = 0,35 Q_{отв.1}$ . Конкретные значения коэффициентов  $K_{1,2}$ ,  $K_{1,3}$  и  $K_{1,4}$  приняты близкими к соотношению суммарных отборсов воды из прр-должений рассмат-

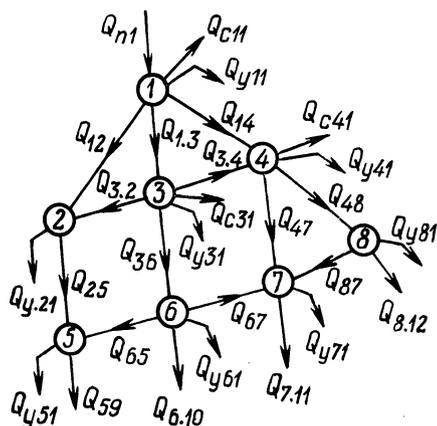


Рис. 2. Схема расчета рационального потокораспределения сети.

риваемых линий и их ответвлений. Кроме того, учтен тот факт, что центральная линия 1 - 3 частично питает соседние, являющиеся продолжением линий 1 - 2 и 1 - 4, а также то, что она по кратчайшему пути соединяет точку питания сети с ее центром водоразбора.

Поскольку расход наиболее загруженной линии 1 - 3 меньше половины распределяемого, требования к надежности водоснабжения потребителей выполнены. Выполнены также и требования экономического характера. Поэтому намеченное потокораспределение в узле 1 может быть признано рациональным.

Полученные расходы  $Q_{12}$ ,  $Q_{13}$  и  $Q_{14}$  передаются в узлы 2, 3 и 4 с противоположными знаками. Чтобы продолжить распределение потока воды по сети дальше, данные узлы рассматривают аналогично узлу 1. При этом начинают с узла 3, чтобы найти в нем пока неизвестные расходы  $Q_{32}$  и  $Q_{34}$ , которые нужны будут в последующем для выявления расходов питания узлов 2 и 4. Аналогичным образом поступают при рассмотрении всех остальных узлов сети. По мере удаления от точки питания сети требования к выбору величины коэффициентов распределения  $K_{ij}$  (из условия обеспечения необходимой

надежности водоснабжения потребителей) снижаются и возрастают требования к экономичности распределения воды по сети. Поэтому главным для назначения  $K_{ij}$  водоотводящих линий таких узлов является более полная загрузка тех линий, направление которых совпадает с основным направлением транспорта воды в сети.

При этом для определения рациональных значений  $K_{ij}$  широко можно пользоваться выражением (14).

### Л и т е р а т у р а

1. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. - М., 1974.
2. Старинский В.П. Номограммы для гидравлического расчета водопроводных труб. - Минск, 1981.
3. Старинский В.П. Проектирование водоводов минимальной приведенной стоимости и заданной надежности подачи воды потребителям. - В сб.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. - Минск, 1980, вып. 10.
4. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Водоснабжение, наружные сети и сооружения. - М., 1976.
5. Шевелев Ф.А. Таблица для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. - М., 1973.

УДК 628.17

И.К.Лазарчик, ст. препод. (БПИ)

### ЗОНИРОВАНИЕ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВЫХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ

Экономической целесообразностью устройства зонной системы водоснабжения высотных зданий интересуются уже давно. В частности, еще в 1938 г. Н.Ф.Фальковский [1] указывал на актуальность данной проблемы. Однако четкое экономическое обоснование оптимального количества зон в здании до сих пор отсутствует и только в МИСИ были сделаны рекомендации, по которым экономически целесообразно устраивать первую зону (нижнюю) для целого микрорайона высотой в 5 - 8 этажей [2, 3].

В данной работе делается попытка анализа зонной системы водоснабжения жилых зданий высотой до 26 этажей для выявления экономической целесообразности устройства в таких зданиях зонных систем хозяйственно-питьевого водопровода.