

( $X_2$ ), схема зонирования ( $X_8$ ) и норма водопотребления ( $X_4$ ). Несколько менее влияют такие факторы, как свободный напор воды у потребителя ( $X_1$ ), взаимное расположение направления подачи воды от источника до объекта к направлению ее движения по территории города ( $X_7$ ) и отношение ширины к длине территории города ( $B/L, X_6$ ).

Таким образом, приведенные уравнения регрессии ( $Y_1; Y_2; Y_3$ ), как адекватно описывающие влияние различных факторов на рассмотренные функции откликов, могут быть использованы в качестве интерполяционных формул для определения ряда зависимостей.

### Л и т е р а т у р а

1. Л а з а р ч и к И.К. Критерий оптимальности для экономико-математической модели зонной системы хоз.-питьевого водопровода города. ЦНИИКИВР. — Минск, 1979. 2. Э л ь п е р В.Л., Б р у к - Л е в и н с о н Т.Л., Р я б и к о в Т.Т. Опыт применения математического планирования эксперимента в исследованиях по очистке воды. — Минск, 1971. 3. Т и х о м и р о в В.Б. Планирование и анализ эксперимента. — М., 1974. 4. А д л е р Ю.П. Введение в планирование эксперимента. — М., 1969. 5. Г л е з е р А.Л. Зонные системы водоснабжения микрорайонов с застройкой зданиями разной этажности. — В сб.: Борьба с потерями воды в промышленности и коммунальном хозяйстве. М., 1969.

УДК 628.143.001.2

В.П. Старинский

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВОДОВОДОВ МИНИМАЛЬНОЙ ПРИВЕДЕННОЙ СТОИМОСТИ И ЗАДАННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПОДАЧИ ВОДЫ ПОТРЕБИТЕЛЯМ

Водоводы относятся к тем основным элементам системы водоснабжения, которые в значительной мере определяют надежность и экономичность подачи воды потребителям. Поэтому понятен интерес к вопросам выбора параметров и расчета водоводов.

Из большого перечня этих вопросов важнейшими являются выбор расчетной скорости движения воды в трубах, назначение экономически наиболее целесообразного числа ниток труб, их диаметра, а также определение необходимого числа перемычек между нитками водовода. Их решение должно осуществляться комплексно. Однако конкретные рекомендации по осуществлению такого решения отсутствуют, а имеющиеся предложения по определению отдельных параметров водоводов являются неполными и требуют дальнейшего совершенствования [1,2,3,5] .

СНиП П-31-74 рассмотренные параметры рекомендуют принимать на основе технико-экономических расчетов водоводов. Но такие расчеты в обычном своем представлении достаточно сложны и трудоемки и применение их может быть оправдано лишь для крупных объектов, по кото-

рым разрабатывается несколько вариантов инженерных решений. Поэтому представляется целесообразным иметь более простую, но достаточно надежную методику технико-экономического обоснования оптимальных параметров водоводов с учетом взаимосвязи технических и экономических решений, а также вопросов обеспечения требуемой надежности подачи воды потребителям. Эту общую задачу можно решать последовательно. При этом следует учитывать необходимость соблюдения соответствующих технических норм и правил проектирования водоводов.

В частности, скорость транспортирования воды по ниткам водовода должна приниматься в соответствии с их диаметром и условиями строительства. Выполнивший автором анализ приведенных в [5] данных по предельным экономическим скоростям движения воды в водопроводных трубах позволяет рекомендовать определять эту скорость по формуле

$$v_p = v_0 + a \sqrt{\frac{d}{\mathcal{E}}}, \quad (1)$$

где  $v_0$  — часть скорости, не зависящая от диаметра и экономического фактора водовода и принимаемая равной 0,7 м/с для стальных, чугунных и железобетонных труб, 0,85 — асбестоцементных и 0,60 м/с — для пластмассовых труб;  $a$  — параметр, равный 0,70 — для стальных, 1,1 — чугунных и железобетонных, 1,5 — асбестоцементных и 2,5 — для пластмассовых труб;  $d$  — внутренний диаметр труб (в м);  $\mathcal{E}$  — экономический фактор.

Число ниток водовода рекомендуется назначать исходя из необходимости обеспечения заданной надежности подачи расчетного расхода воды при минимальных приведенных затратах. Для этого рассмотрим сначала условия обеспечения минимума приведенных затрат по водоводу.

Из [1,3,5] известно, что строительную стоимость одиночной линии водопроводной сети или водовода можно представить выражением вида  $C_B = (A + Bd^\alpha) L$ .

Если же водовод длиной  $L$  состоит из  $n_B$  ниток каждая диаметром  $d$ , то его строительную стоимость можно представить как

$$C_B = \varphi K_{II} n_B (A + Bd^\alpha) L, \quad (2)$$

где  $A$  и  $B$  — параметры экономической характеристики одной нитки,  $\alpha$  — показатель степени этой характеристики;  $K_{II}$  — коэффициент, учитывающий возрастание стоимости водовода за счет устройства перемычек и камер переключения;  $\varphi$  — коэффициент, учитывающий удорожание или удешевление (в зависимости от местных условий) строительства водовода при совместной прокладке нескольких ниток.

Расчетная пропускная способность водовода с учетом (1) равна

$$Q_B = n_B \omega_B v_p = \frac{n_B \pi d^2}{4} (v_0 + a \sqrt{\frac{d}{3}}) . \quad (3)$$

Тогда удельные строительные затраты на единицу пропускной способности водовода составят

$$C_B = \frac{C_B}{Q_B} = \frac{4\varphi K_{II} (A + Bd^\alpha) L}{\bar{n} d^2 (v_0 + a \sqrt{\frac{d}{3}})} . \quad (4)$$

Поскольку  $\alpha < 2$ , во всех случаях с ростом  $d$  будет уменьшаться  $C_B$ , а следовательно, и его общая стоимость. Это значит, что для снижения строительной стоимости водовода необходимо стремиться к максимально возможному уменьшению числа его ниток и увеличению диаметра их труб. Предельным в смысле минимизации строительных затрат является водовод, состоящий из одной нитки труб.

Покажем, что этому условию удовлетворяет и требование минимума энергетических затрат на транспорт воды по водоводу. В частности, зависящую от  $n_B$  и  $d$  величину удельных затрат энергии представим как

$$w = \frac{\xi Q_B \Delta H}{\eta Q_B} = \frac{\xi}{\eta} \Delta H , \quad (5)$$

где  $\xi$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий размерность входящих в выражение (5) величин;  $Q_B$  — подача воды по водоводу;  $\Delta H$  — потери напора в водоводе;  $\eta$  — к.п.д. насосного оборудования.

Известно, что потери напора в водоводе, работающем в области квадратичных сопротивлений, можно представить в виде

$$\Delta H = s_0 L \left( \frac{Q_B}{n_B} \right)^2 = \frac{s_0}{n_B^2} L Q_B^2 . \quad (6)$$

Если вместо величины  $Q_B$  подставить ее значение по (3), а коэффициент удельного сопротивления  $s_0$  выразить известной формулой  $s_0 = k : d^m$ , то зависящие от  $n_B$  и  $d$  удельные затраты энергии на транспорт по водоводу воды представятся как

$$w = \frac{k \xi \bar{n}^2 L d^4}{16 \eta d^m} \left( v_0 + a \sqrt{\frac{d}{3}} \right) . \quad (7)$$

Здесь  $k$  и  $m$  – коэффициент и показатель степени, характеризующие гидравлические свойства применяемых труб. Поскольку  $m = 5,1 \div 5,3 > 4$ , то из (7) следует, что с ростом  $d$  и соответственно с уменьшением  $n_v$  водовода величина удельных и общих энергетических затрат на транспорт по нему воды уменьшается. Значит, и по энергетическим затратам водоводы с минимальным числом ниток являются наиболее эффективными.

Естественно, с уменьшением числа ниток и увеличением их диаметра снижаются амортизационные отчисления от стоимости водоводов, а также эксплуатационные затраты. Снижаются поэтому и их полные приведенные затраты.

На основании изложенного число ниток при проектировании водоводов необходимо принимать минимально возможным, исходя только из условия обеспечения необходимой надежности подачи воды потребителям. Иногда приходится учитывать и другие факторы, например наличие труб определенного сортамента, необходимость наращивания производительности водовода в несколько этапов в соответствии с расширением подопотребления и т.п.

В последнем случае учитываем разновременность капиталовложений, приводя их к выбранному расчетному сроку сравнения. Чтобы избежать значительного "замораживания" средств, нередко приходится прибегать к некоторому завышению числа ниток водовода за счет соответствующего уменьшения их диаметров. Производительность же водовода наращивают поэтапно, путем последовательного увеличения работающих ниток. Число ниток на каждом этапе принимают в соответствии с необходимостью подачи расчетных расходов воды с требуемой надежностью. Эффективность такого мероприятия всегда будет целесообразной при соблюдении условия

$$E \sum_{i=1}^n \frac{C_{Bi}}{(1+E_H)^{t_i}} + I_t \leq EC_{BO} + I_0, \quad (8)$$

где  $E$  – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений в водоснабжение – 0,12;  $E_H$  – норматив для приведения разновременных затрат к выбранному базисному сроку – 0,08;  $C_{Bi}$  – капиталовложения в строительство водовода на отдельных этапах его развития;  $t_i$  – период приведения этих капиталовложений к базисному сроку в годах, равный разности времени осуществления капиталовложений по рассматриваемым этапам развития водовода и времени его одноэтапного осуществления;  $I_t$  и  $I_0$  – конечные годовые эксплуатационные издержки водовода, создаваемого по варианту многоэтапного и единовременного его строительства;  $C_{BO}$  – разовые капиталовложения в строительство водовода по варианту единовременного его существования.

В практике проектирования число ниток принимается обычно равным двум при одноэтапном и трем-четырем — при многоэтапном их строительстве.

Во всех случаях проектирования водоводов диаметры их отдельных ниток рекомендуется принимать по возможности одинаковыми во избежание последующих затруднений в эффективном использовании их из-за неравномерной загрузки

Величина диаметра ниток определяется из (3) путем последовательного уточнения расчетов по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4Q_B}{n_B n (v_0 + a \sqrt{\frac{d}{\vartheta}})}} \quad (9)$$

Фактический расход воды, перекачиваемой по запроектированному изложенным способом водоводу, зависит от величины высоты ее подъема  $H_{\Gamma}$  по пути транспортирования, свободного напора  $H_{CB}$  в конце водовода и параметров насосного оборудования. Если на насосной станции установлены  $n_H$  одинаковых насосов с напорными характеристиками  $H_H = H_0 - S_H Q_H^2$ , то в неаварийных ситуациях фактическую подачу воды можно определить из условия  $H_H = H_B$  или из равенства

$$H_0 - \frac{S}{n^2} Q^2 = H_{\Gamma} + H_{CB} + \frac{s_0}{n_B^2} L Q^2 \quad (10)$$

Откуда

$$Q = \sqrt{\frac{H_0 - H_{\Gamma} - H_{CB}}{\frac{s_0}{n_B^2} L + \frac{S_H}{n^2}}} \quad (11)$$

где  $H_0$  — напор насосной станции, развиваемый при закрытых задвижках на напорных линиях;  $S_H$  — фиктивное сопротивление насосного агрегата станции;  $n_H$  — число подключенных на совместную (параллельную) работу насосных агрегатов.

Участки, которые выходят из строя, с помощью перемычек выключаются из работы. В результате коэффициент гидравлического сопротивления водовода возрастает, а подача по нему воды падает. Чем больше перемычек на водоводе, тем меньше снижение подачи и наоборот. Поэтому

необходимое число перемычек между нитками определяется из условия гарантированного обеспечения подачи расчетного аварийного расхода воды  $Q_{\text{авар}}$ .

Если между  $n_B$  нитками водовода длиной  $L$  установить по  $z$  равноотстоящих друг от друга перемычек, то средняя длина участка водовода между перемычками составит  $l = L : (z + 1)$ . Предположим, что одновременно может выйти из строя по одной нитке водовода на  $e$  последовательных его участках. Тогда коэффициент гидравлического сопротивления водовода будет равен

$$S_B = K \left[ \frac{z+1-e}{z+1} L \frac{s_0}{n_B^2} + \frac{e}{z+1} L \frac{s_0}{(n_B-1)^2} \right] =$$

$$= K L s_0 \left[ \frac{z+1-e}{(z+1)n_B^2} + \frac{e}{(z+1)(n_B-1)^2} \right], \quad (12)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий дополнительное сопротивление потоку воды при протекании его по перемычкам и равный 1,05–1,10 в зависимости от числа и конструкции перемычек.

Расход воды, подаваемый насосной станцией по водоводам, в этом случае можно найти из условия

$$H_0 - \frac{S}{n_H^2} Q^2 = H_r + H_{св} + K L s_0 \left[ \frac{z+1+e}{(z+1)n_B^2} + \frac{e}{(z+1)(n_B-1)^2} \right] Q^2. \quad (13)$$

Сопоставив его с допустимым аварийным расходом  $Q_{\text{авар}}$ , можно прийти к выводу о допустимости принятого числа перемычек на водоводе. Однако такой подход к решению задачи неудобен. Проще задаться величиной аварийного расхода

$$Q_{\text{авар}} = \psi_{\text{авар}} Q_B, \quad (14)$$

подставить его в выражение (13) вместо величины  $Q$  и из него определить требуемое число перемычек

$$z = \frac{en_B^2 - (e + Nn_B^2 - 1)(n_B - 1)^2}{(Nn_B^2 - 1)(n_B - 1)^2}, \quad (15)$$

где

$$N = \frac{H_0 - H_\Gamma - H_{св} - \frac{S_H}{n^2} \psi_{авар}^2 Q_B^2}{KLS_0 \psi_{авар}^2 Q_B^2}. \quad (16)$$

Здесь  $\psi_{авар}$  – коэффициент, учитывающий допустимое снижение расчетного расхода воды в аварийных ситуациях на водоводе.

Но выход из строя отдельных ниток водовода возможен и по другой схеме. Например, самым неблагоприятным может оказаться случай, когда одновременно выйдет из строя  $e$  ниток на одном его участке. В этом случае коэффициент гидравлического сопротивления водовода

$$S_B = K \left[ \frac{zL}{z+1} \frac{s_0}{n_B^2} + \frac{L}{z+1} \frac{s_0}{(n_B - e)^2} \right] =$$

$$= KLS_0 \left[ \frac{z}{(z+1)n_B^2} + \frac{1}{(z+1)(n_B - e)^2} \right]. \quad (17)$$

Как и в предыдущем случае, подаваемый насосной станцией расход воды по водоводу или необходимое число перемычек  $z$  для обеспечения подачи заданного аварийного расхода  $Q_{авар} = \psi_{авар} Q_B$  можно определить из выражения

$$H_0 - \frac{S_H}{n^2} Q^2 = H_\Gamma + H_{св} + KLS_0 \left[ \frac{z}{(z+1)n_B^2} + \frac{1}{(z+1)(n_B - e)^2} \right] Q. \quad (18)$$

В частности, требуемое число перемычек при рассматриваемой схеме аварий должно быть равным

$$z = \frac{n_B^2 [1 - N(n_B - e)^2]}{(n_B - 1)^2 (Nn_B^2 - 1)}, \quad (19)$$

где  $N$  – та же величина, что и в предыдущем случае.

Сопоставляя полученные выражения (15) и (19) для определения  $z$ , легко убедиться, что второй вариант схемы возникновения аварий на

водоводе является более тяжелым, требуя большего числа перемычек.

Поэтому этот вариант выхода из строя отдельных участков должен приниматься как расчетный.

Для двухниточных водоводов рассматриваемые варианты надежности подачи по ним воды являются равноценными. В этом случае  $n_B = 2$  и  $e = 1$ , и поэтому число перемычек

$$z = \frac{4(1 - N)}{4N - 1}, \quad (20)$$

что вытекает одновременно из формул (15) и (19) при подстановке в них соответствующих значений величин  $n_B$  и  $e$ .

При проектировании гравитационных (самотечных) водоводов  $H_O$  и  $S_H$  равны нулю из-за отсутствия в системе подачи воды насосного оборудования. Поэтому

$$N = \frac{H_r - H_{CB}}{KL_s \psi^2 \frac{Q^2}{авар\ в}}, \quad (21)$$

что выводится из (16) при подстановке значений  $H_O = 0$  и  $S_H = 0$  и с учетом в данном случае отрицательного знака величины геометрического подъема  $H_r$ .

Используя приведенные расчетные зависимости, можно осуществить не только рациональное проектирование водоводов, но и найти режимы их работы в различных эксплуатационных ситуациях. Например, изменяя величины  $n_B$ ,  $n_H$  и  $e$ , можно определять, каким образом будет изменяться подача системы насосная станция — водовод при различном сочетании числа работающих насосных агрегатов, количества ниток водовода, их отдельных участков и т.д. Для этого необходимо разрешить относительно  $Q$  выражения (13) и (18) и подставить в них соответствующие величины  $n_B$ ,  $n_H$ ,  $e$ .

Следовательно, при проектировании водоводов необходимо учитывать не только высоту подъема и количество перекачиваемой по ним воды, но и особенности наращивания пропускной способности водоводов во времени, параметры оборудования работающей на водовод насосной станции и др.

Большинство из этих данных задаются или принимаются в соответствии с проектом системы водоснабжения. Что же касается параметров насосного оборудования  $S_H$  и  $H_O$ , то они принимаются как справочные величины для намеченных или предполагаемых к использованию типов на-

сосов. В тех случаях, когда эти данные по различным причинам отсутствуют, но имеются рабочие характеристики интересующего нас насосного оборудования, их можно получить расчетом по следующим рекомендуемым зависимостям:

$$S_H = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2} \quad \text{и} \quad H_0 = 0,5 [H_1 + H_2 + S_H(Q_1^2 + Q_2^2)] \quad (22)$$

Здесь  $H_1$  и  $H_2$  — напоры насоса, взятые из его рабочей характеристики соответственно для левой и правой крайних точек области рекомендуемого применения насоса;  $Q_1$  и  $Q_2$  — соответствующие этим напорам подачи воды.

Необходимо отметить, что для определения параметров  $S_H$  и  $H_0$  насосов величины  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $Q_2$  принципиально можно принимать в любых двух крайних точках напорной характеристики насосов из области их возможной работы. Однако рекомендуемые выше точки дают более точные результаты и поэтому их учет предпочтительнее.

Определение с помощью рассмотренной методики оптимальных параметров водоводов при заданной надежности подачи по ним воды производится по следующему алгоритму:

1. Назначают несколько вариантов водовода по числу ниток труб и времени ввода их в эксплуатацию.

2. По формуле (1) определяют экономически наиболее целесообразные скорости транспортирования воды по их ниткам. При этом предварительно намечают диаметр ниток по формуле (9), задавшись примерным значением  $v_p$  в пределах 1,0–2,0 м/с.

3. По найденным таким образом скоростям определяют по (9) необходимые диаметры ниток водовода.

4. Исходя из полученных данных, находят необходимые параметры основного оборудования насосной станции и по (11) проверяют возможность обеспечения расчетного расхода воды по всем вариантам водовода.

5. По формулам (15), (19) или (20) в зависимости от конкретных условий определяют число перемычек между нитками для всех вариантов водовода.

6. С использованием формул (2) или другими способами, например составлением смет, устанавливают строительную стоимость и эксплуатационные расходы по всем вариантам водовода и с помощью (8) выбирают экономически выгодный вариант.

## Л и т е р а т у р а

1. А б р а м о в Н.Н. Водоснабжение. — М., 1974. 2. И в а н о в К.И. Гидравлические и технологические расчеты по водоснабжению. — М., 1963. 3. М о ш н и н Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей. — М., 1950. 4. Справочник проектировщика. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий. — М., 1977. 5. Ш е в е л е в Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. — М., 1973.

УДК 628.152

С.П. С е д л у х а

### РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ДЛЯ НЕЗАВИСИМО РАБОТАЮЩИХ ВОДОПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ МЕСТНЫХ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

Наиболее простой и удобный метод технико-экономического расчета водопроводных сетей предложен Л.Ф. Мошниним [1,2]. Им же введено понятие "пределный расход". При независимо работающей линии предельным для данного диаметра трубы является такой расход, при котором этот диаметр оказывается экономически равноценным сортаментному диаметру. Иначе говоря, диаметр  $d_i$  экономически выгодно применять при подаче по нему расхода, лежащего между предельными для диаметров  $d_{i-1}$  и  $d_i$ .

В формулу для расчета предельных расходов по методу Л.Ф. Мошнина, помимо ряда других величин, входят коэффициент  $b$  и показатель степени  $\alpha$  из формулы

$$C = b_0 + bd^\alpha, \quad (1)$$

определяющей стоимость строительства единицы длины трубопровода диаметром  $d$ , а также показатели степени  $n$  и  $m$  из эмпирической формулы гидравлического уклона вида

$$i = k \frac{q^n}{d^m}, \quad (2)$$

аппроксимирующей формулы Ф.А. Шевелева [1,3].

В связи с трудностью определения параметров формулы (1) для конкретных условий строительства предельные расходы в большинстве случаев определяются по таблицам, рассчитанным для осредненных условий [3]. Выполненные нами исследования для условий Целиноградской области показали, что табличные значения предельных расходов для от-