

## Методика расчета и оптимизации работы систем подачи и распределения воды с водозаборными скважинами

*Аспирант О. Ю. Поберезниченко;  
к.т.н., старший научный сотрудник Т.П. Хомуецкая,  
Институт водных проблем и мелиорации*

**Аннотация.** В статье предложена методика выполнения гидравлических и технико-экономических расчетов водопроводных систем с водозаборными скважинами, позволяющая находить оптимальный состав сооружений системы и самые эффективные режимы их совместной работы во время эксплуатации.

Одними из наиболее сложных для гидравлических и технико-экономических расчетов являются системы подачи и распределения воды, в комплекс которых входят водозаборные скважины с погружными центробежными насосами. При проектировании новых, наладке построенных и реконструкции действующих систем необходимо решать задачи выбора оптимального состава сооружений, экономичных их размеров и наиболее выгодного режима совместной работы.

В настоящее время при заборе подземных вод такие системы являются наиболее распространенными, а сложность оптимизационных расчетов совместной работы входящих в них взаимодействующих сооружений заключается в необходимости определения характеристик всех скважин, их взаимного влияния друг на друга, а также изменения характеристик во время эксплуатации.

**Ключевые слова:** система подачи и распределения воды; ресурсосохранение; гидравлическое сопротивление; потери напора; удельный расход электроэнергии

### *Введение*

Известно, что стоимость потребляемой электроэнергии является одной из главных составляющих, формирующих себестоимость воды на водопроводных станциях, поэтому меры, направленные на снижение энергопотребления при обеспечении расчетных значений напора и подачи воды, очень актуальны в условиях увеличения тарифов на электроэнергию в настоящее время [1].

Сегодня вычислительная техника позволяет выполнять гидравлические и технико-экономические расчеты современных гидросистем любой сложности и с высокой степенью точности. Существует большое количество методов расчетов. Однако точность расчетов зависит от достоверности исходных данных, которым, к сожалению, уделяется недостаточное внимание. А это во многих случаях приводит к возникновению противоречий между проектированием и реальными условиями эксплуатации и в конечном итоге к необеспечению потребителей водой в заданном количестве под необходимым напором и перерасходованию средств [2]. Недостаточная эффективность работы действующих систем подачи и распределения воды (СПРВ) является одной из основных причин отсутствия воды у потребителей, несмотря на большие капиталовложения, затрачиваемые на реконструкцию этих систем. Более того, имеются случаи, когда такая реконструкция приводила к ухудшению водоснабжения в отдельных районах города [3].

Поэтому важна разработка методов расчета реконструируемых СПРВ и выбора оптимального режима работы водопроводных сооружений, эти методы освещены в литературе недостаточно.

При решении таких задач в расчетах математических моделей следует учитывать реальные характеристики всех сооружений и прогнозировать их изменение в процессе эксплуатации системы [4].

## Обзор литературы

Вопросы оптимизации СПРВ, а также технико-экономические расчеты водоводов и водопроводных сетей уже давно изучаются учеными разных стран [5].

Первые работы по технико-экономическому расчету водопроводных сетей были опубликованы А.А. Суриным (1927 г.) и Н.Н. Гениевым (1928 г.). В работе А.М. Занфирова (1933 г.) постановка задачи была существенно расширена. В ней учитывались не только влияние разветвленности, но и нелинейность зависимости стоимости труб от ее диаметра. Дальнейшее совершенствование метода технико-экономического расчета теплофикационной трубопроводной системы было дано в работах Б.Л. Шифринсона (1940 г.) [6].

Наиболее обобщенный метод экономического расчета кольцевых водопроводных сетей дан В.Г. Лобачевым (1938–1950 гг.). Далее появились работы М.В. Кирсанова (1949 г.), Д.М. Минца (1951 г.), А.В. Теплова (1946–1950 гг.), В.П. Сироткина (1951 г.) и ряда других исследователей. Заслуживают внимания работы Л.Н. Диасамидзе, М.А. Мосткова, Г.Г. Сванидзе, В.С. Дикаревского и др. [2].

Усовершенствованный метод технико-экономического расчета разветвленных и кольцевых водопроводных сетей разработал Л.Ф. Мошнин (1940–1950 гг.) [6].

В 1970–1980 гг. значительное внимание уделяется вопросам исследования и анализа работы действующих СПРВ с целью интенсификации их работы и реконструкции, результаты этих исследований получили широкое распространение [7–16].

Значительный вклад в научные разработки в области исследования систем подачи и распределения воды внес российский ученый Н.Н. Абрамов (1960–1980 гг.) [17–19] и украинский ученый П.Д. Хоружий [2, 20, 21, 22, 23].

В Украине в настоящее время над этой тематикой работают ученые Института водных проблем и мелиорации НААН.

## Постановка задачи

Основные требования к действующим СПРВ – это надежность и бесперебойность обеспечения водой всех потребителей в заданном количестве и под требуемым напором при наименьших приведенных затратах. Однако эти требования могут не выполняться вследствие непрерывного роста водопотребления и изменения (в худшую сторону) характеристик водопроводных систем [24].

СПРВ являются динамичными системами, в которых происходит непрерывное изменение как размеров и режимов водопотребления, так и характеристик входящих в них сооружений, что зачастую приводит к неудовлетворению требований отдельных водопотребителей. Принимаемые меры по исправлению создавшегося положения не всегда рациональны и экономичны, часто приводят к перерасходу строительных и эксплуатационных ресурсов [25].

СПРВ включают в себя насосные станции, водоводы, водопроводную сеть с расположенными на ней напорно-регулирующими сооружениями. Это наиболее сложная и дорогостоящая часть современных городских водопроводов. Стоимость таких систем достигает 80% общей стоимости водопровода, а выбор оптимальных размеров сооружений и наиболее эффективных режимов их совместной работы вызывает наибольшие трудности [26].

## Описание методики

Для оптимизации совместной работы сооружений в СПРВ разработана методика расчетов, согласно которой подачу воды из каждой (i-й) скважины можно определить по формуле:

$$Q_i = P_i \left[ \frac{-1/q_i + \sqrt{(1/q_i)^2 + 4(H_{\phi,i} - H_{z,i} - \sum h_i)(S_{k,i} + S_{e,i} + S_{\phi,i})}}{2(S_{k,i} + S_{e,i} + S_{\phi,i})} \right], \text{ л/с}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – параметр, указывающий, работает ли эта скважина ( $P_i = 1$ ) в настоящее время в расчетной системе водоснабжения или она отключена ( $P_i = 0$ );  $q_i$  – удельный дебит скважины, л/(с·м);  $H_{ф.i}$  и  $S_{ф.i}$  – параметры гидравлической характеристики Q-H насоса, установленного в данной скважине, соответственно, м и (с/л)<sup>2</sup>м;  $H_{э.i}$  – геометрическая высота водоподъема от статического уровня воды в скважине  $Z_{ст.i}$  до расчетного уровня воды в резервуаре  $Z_p$  (рис. 1), м;  $S_{к.i}$  и  $S_{в.i}$  – гидравлические сопротивления в коммуникациях насосной установки и в соединительном трубопроводе от скважины до точки подключения к совместному водоводу, (с/л)<sup>2</sup>м;  $\Sigma h_i$  – сумма потерь напора на общих участках водовода в схеме движения воды к сборному резервуару, м.

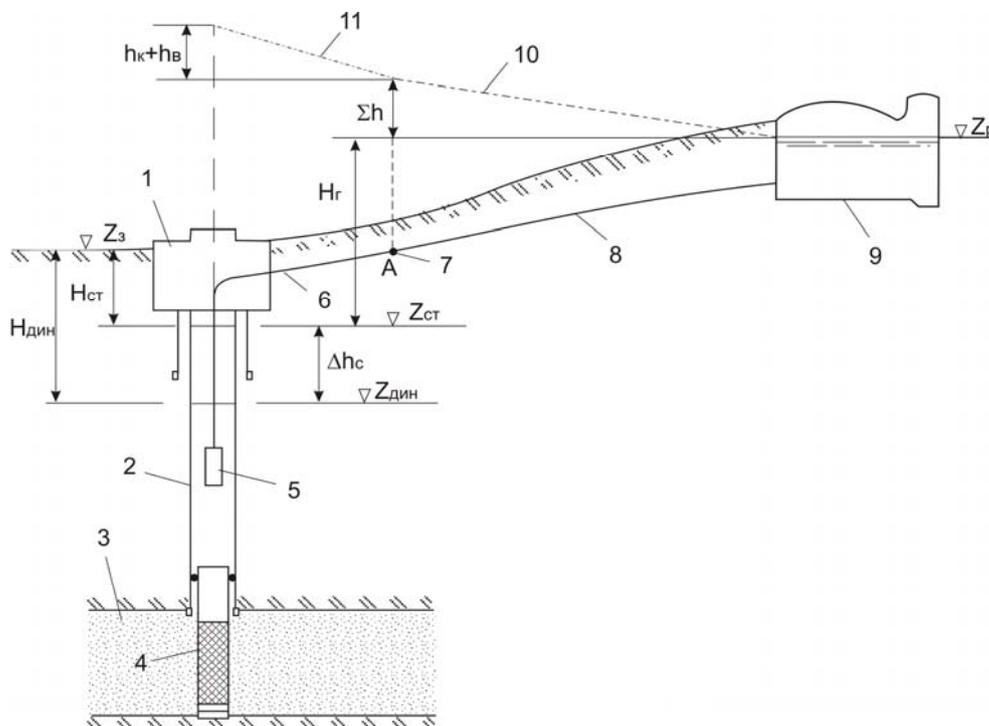


Рисунок 1. Расчетная схема подачи воды из скважины в резервуар [20]:

1 – оголовок; 2 – эксплуатационная обсадная колонна; 3 – водоносный пласт; 4 – фильтр; 5 – насосный агрегат; 6 – соединительный трубопровод от скважины к водоводу; 7 – точка подключения скважины к совместному водоводу; 8 – совместный водовод; 9 – резервуар; 10 – пьезометрическая линия в водоводе; 11 – пьезометрическая линия в соединительном трубопроводе и коммуникациях насосной установки

Для расчетов необходимы следующие исходные данные [27]:

- расчетная отметка уровня воды в резервуаре  $Z_p$ ;
- отметки поверхности земли у скважин  $Z_{э.i}$ ;
- глубина статического  $H_{ст.i}$  и динамического  $H_{дин.i}$  уровней воды каждой из скважин;
- подача воды из скважин  $Q_{п.i}$  по паспортным или опытным данным;
- удельное гидравлическое сопротивление трубопроводов (в зависимости от материала и диаметра) на пути от каждой скважины до общего водовода  $A_{т.i}$  и на общих участках транспортировки воды к РЧВ  $A_{т.сп.j}$ ;
- длина трубопроводов от каждой скважины до общего водовода  $L_i$  и длина всех участков общего водовода  $L_{сп.j}$ ;
- марки установленных в скважинах насосов и соответствующие им значения параметров гидравлических ( $H_{ф.i}$  и  $S_{ф.i}$ ) и энергетических ( $A_i$ ,  $B_i$  и  $\alpha_i$ ) характеристик.

Значение  $S_k$  из формулы (1) учитывает гидравлическое сопротивление движению воды в щели между электродвигателем погружного насоса и эксплуатационной обсадной колонной, а также в водоподъемной трубе скважины и местные гидравлические сопротивления в ней:

$$S_k = \frac{h_{ш}}{Q_n^2} + 1,1 A_m \cdot \ell, \text{ (с/л)}^2\text{м}, \quad (2)$$

где  $h_{\text{щ}}$  – потери напора в щели между электродвигателем погружного насоса и эксплуатационной обсадной колонной, м;  $A_m$  и  $l$  – соответственно удельное сопротивление,  $(\text{с/л})^2$ , и длина водоподъемных труб в скважине, м; 1,1 – коэффициент, учитывающий местные сопротивления в водоподъемных трубах;  $Q_H$  – расчетный расход воды насосом, л/с.

$$h_{\text{щ}} = \frac{0,04l_e + 0,3(D_k - D_e)}{12,1(D_k + D_e)^2 (D_k - D_e)^3} Q_c^2, \text{ м}, \quad (3)$$

где  $l_e$  – длина электродвигателя, м;  $D_k$  – внутренний диаметр эксплуатационной обсадной колонны скважины, м;  $D_e$  – диаметр электродвигателя, м;  $Q_c$  – расход воды, забираемой из скважины,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Ориентировочно гидравлическое сопротивление  $S_k$  можно определить как [28]

$$S_k = \frac{h_k}{Q_H^2}, \text{ (с/л)}^2 \text{ м}, \quad (4)$$

где  $h_k$  – потери напора в коммуникациях насосной установки ( $h_k \approx 2-4$  м).

Гидравлическое сопротивление соединительного трубопровода от скважины до точки подключения к совместному водоводу (точка А, рис. 1) определяют по формуле

$$S_e = A_t \cdot L, \quad (\text{с/л})^2 \text{ м}, \quad (5)$$

где  $A_t$  – удельное гидравлическое сопротивление трубопровода,  $(\text{с/л})^2$ , которое принимают в зависимости от материала, диаметра и срока эксплуатации труб;  $L$  – длина трубопровода, м.

Отметки статического  $Z_{\text{ст},i}$  и динамического  $Z_{\text{дин},i}$  уровней воды определяют по результатам экспериментальных исследований скважин [29]:

$$Z_{\text{ст},i} = Z_{3,i} - H_{\text{ст},i}, \text{ м}, \quad (6)$$

$$Z_{\text{дин},i} = Z_{3,i} - H_{\text{дин},i}, \text{ м}, \quad (7)$$

где  $Z_{3,i}$  – отметка поверхности земли у скважины, м;  $H_{\text{ст},i}$  и  $H_{\text{дин},i}$  – соответственно глубина статического и динамического уровней, м.

Геометрическую высоту водоподъема находят как разность между расчетным уровнем воды в резервуаре  $Z_p$  и статическим уровнем воды в скважине  $Z_{\text{ст},i}$ :

$$H_{e,i} = Z_p - Z_{\text{ст},i}, \text{ м}. \quad (8)$$

Удельный дебит скважины определяют по формуле

$$q_i = \frac{Q_i}{\Delta h_{c,i}}, \text{ л/с}\cdot\text{м}, \quad (9)$$

где  $\Delta h_{c,i}$  – снижение статического уровня воды в скважине при откачке из нее расхода воды  $Q_i$ :

$$\Delta h_{c,i} = Z_{\text{ст},i} - Z_{\text{дин},i}, \text{ м}. \quad (10)$$

Параметры  $H_\phi$  и  $S_\phi$  из формулы (1) определяют, используя зависимости [20]:

$$H_\phi = H_1 + S_\phi Q_1^2 = H_2 + S_\phi Q_2^2; \quad (11)$$

$$S_\phi = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}, \quad (12)$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – напоры насоса при подаче им расходов воды соответственно  $Q_1$  и  $Q_2$ , которые принимают из характеристики Q-H насоса в зоне его рекомендованного применения (в зоне наивысшего КПД).

Поскольку в формуле (1) величина  $\Sigma h_i$  зависит от расхода воды из других скважин, который перед расчетами неизвестен, то задача по определению расхода воды  $Q_i$  является неопределенной, и ее можно решить только путем итераций. Целесообразно при этом использовать современное программное обеспечение персональных компьютеров, которое позволяет быстро и с высокой точностью производить подобные вычисления [30].

Для первого приближения принимают значения предварительно намеченных расходов воды со всех скважин системы в соответствии с паспортными или опытными данными установленных в них насосов. Это дает возможность определить суммарные потери напора на общих участках водовода по пути движения воды к резервуару и за формулой (1) находить новые значения подачи воды со скважин. Расчеты ведут до выполнения для каждой скважины условия

$$\left| Q_i - Q_i' \right| \leq \Delta Q, \quad (13)$$

где  $Q_i$  и  $Q_i'$  – новое и предыдущее значения расхода воды из данной ( $i$ -й) скважины;  $\Delta Q$  – допустимое расхождение в значениях расхода воды.

Если условие (13) не выполняется, то расчеты продолжают, принимая в последующих приближениях для каждой из скважин водопроводной системы средние значения расхода воды:

$$Q_i'' = \frac{Q_i + Q_i'}{2}. \quad (14)$$

Оптимальным будет такой режим работы водозаборных скважин, при котором будет обеспечена подача расчетного расхода воды в резервуар при наименьшем потреблении электроэнергии.

Удельный расход электроэнергии на подачу  $1 \text{ м}^3$  воды из одной скважины в резервуар определяют по формуле

$$E_i = \frac{N_i}{Q_i}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3, \quad (15)$$

где  $Q_i$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $N_i$  – потребляемая на валу насоса мощность, которую можно определить, используя зависимость [2]

$$N_i = A + BQ_i^\alpha, \text{ кВт}, \quad (16)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $\alpha$  – параметры энергетической характеристики насоса, установленного в данной скважине

$$A = \frac{N_1 N_t - N_{cp}^2}{N_1 + N_t - 2N_{cp}}, \quad (17)$$

где  $N_{cp}$  – потребляемая мощность на валу насоса при подаче им воды расходом

$$Q_{cp} = \sqrt{Q_1 Q_t}, \quad (18)$$

где  $t$  – число значений  $Q_i$  и соответствующих им  $N_i$ .

Параметры  $B$  и  $\alpha$  находят как корни системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} t \ln B + \alpha \sum \ln Q_i &= \sum \ln(N_i - A); \\ \ln B \sum \ln Q_i + \alpha \sum (\ln Q_i)^2 &= \sum \ln Q_i \ln(N_i - A) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Средний удельный расход электроэнергии всеми скважинами при расчетной схеме подачи из них воды определяют как

$$E_{cp} = \frac{\sum N_i}{\sum Q_i}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3. \quad (20)$$

Таким образом, математическое моделирование работы гидравлически взаимосвязанных сооружений в системе подачи и распределения воды, включающей скважины, насосы, трубопроводы, совместные водоводы и водосборные резервуары, дает возможность определять подачу воды и потребляемую на валу насоса мощность как каждой отдельной скважины, так и всей водопроводной системы в целом [31, 32].

## Заклучение

1. Данная методика позволяет производить расчеты как вновь проектируемой системы водоснабжения, так и уже эксплуатируемой. Следует отметить, что точность полученных результатов расчета зависит от точности введения исходных данных, поэтому при оптимизации работы действующей водопроводной системы необходимо учитывать изменение характеристик сооружений в процессе их эксплуатации (гидравлических сопротивлений  $S_k$  и  $S_e$ , характеристик насосов, а значит параметров  $H_{\phi}$ ,  $S_{\phi}$ ,  $A$ ,  $B$  и  $\alpha$ , уровней воды и т. д.).

2. Пользуясь изложенной методикой расчета совместной работы сооружений, можно анализировать работу системы при любых возможных условиях (отключение из работы одной или нескольких скважин, замена насосов, трубопроводов и т. п.) и выбирать наиболее выгодный вариант, при котором будет наименьшим удельный расход электроэнергии.

3. Кроме того, в условиях наблюдаемого снижения водопотребления и появления значительного резерва водозаборных и регулирующих сооружений на действующих водопроводах можно использовать предложенную методику расчетов и определять оптимальные режимы работы системы водоснабжения с учетом различной стоимости электроэнергии в дневное и ночное время суток при использовании многозонных тарифов.

## Литература

1. Alexander S.M., Glenn N.L., Bird D.W. Advanced techniques in the mathematical modeling of water-distribution systems // Journal – American Water Works Association. 1975. Vol. 67. No.7. Pp. 20–26.
2. Хоружий П.Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений. Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1983. 152 с.
3. Ramezani Etedali H., Liaghat A., Parsinejad M., Tavakkoli A.R., Bozord Haddad O., Ramezani Etedali M. Water allocation optimization for supplementary irrigation in rainfed lands to increase total income case study: upstream Kerkheh River basin // Irrigation and Drainage. 2013. Vol. 62. No.1. P. 74–83.
4. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks // Building Services Engineer. 1978. Vol. 45. No. 10. Pp. 18–24.
5. Clark R.M. Water supply economics // Journal of the Urban Planning and Development Division. 1976. Vol. 102. No. 1. Pp. 213–224.
6. Robino P., Stellacci A.M., Rana R.M., Catalano M., Caliendo A. A Non-Linear model for optimal allocation of irrigation water and land under adequate and limited water supplies: a case study in Southern Italy // Irrigation and Drainage. 2013. Vol. 62. No. 2. Pp. 145–155.
7. Choi J.-D., Lim K.-J., Won C.H. Catchment water quality management planning for sustainable development of Tidal Areas // Irrigation and drainage. 2013. Vol. 62. Supplement S1. Pp. 18–23.
8. Кикачешвили Г.Е. Методология оптимизации систем подачи и распределения воды. Тбилиси: Технический университет, 2002. 180 с.
9. Карамбиров С.Н. Совершенствование методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации: Автореф. дисс....докт. техн. наук. Москва, 2005. 46 с.
10. Кожин И.В., Колесов В.В., Майзельс М.П., Эгильский И.С. Наладка и интенсификация работы городских систем подачи и распределения воды. М.: Строиздат, 1978. 112 с.
11. Митянин В.М. Повышение эффективности работы системы транспортирования воды // Водоснабжение и санитарная техника. 1980. №2. С. 27.
12. Bhave P.R. Noncomputer optimization of single-source networks // Journal of the Environmental Engineering Division. 1978. Vol. 104. No. 4. Pp. 799–814.
13. Cenedese A., Mele P. Optimal design of water distribution networks // Journal of the Hydraulics Division. 1978. Vol. 104. No. 2. Pp. 237–247.
14. Collins A.G., Jonson R.L. Finite – element method for water-distribution networks // Journal – American Water Works Association. 1975. Vol. 67. No. 7. Pp. 12–16.
15. Рекомендации по сокращению потерь воды в жилищном хозяйстве. М.: ОНТИ АКХ, 1977. 27 с.

16. Эгильский И.С. Кожин И.В. Основные направления интенсификации работы городских систем подачи и распределения воды // Интенсификация и оптимизация городских и промышленных водопроводов. Материалы семинара. М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1973. С. 3–9.
17. Абрамов Н.Н. Водоснабжение: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1982. 440 с.
18. Абрамов Н. Н., Поспелова М. М., Сомов М. А. и др. Расчет водопроводных сетей: Учебное пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 278 с.
19. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. М.: Стройиздат., 1972. 288 с.
20. Хоружий П.Д., Хомуецька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. Киев: Аграрна наука, 2008. 534 с.
21. Хоружий П.Д., Худоба П.Ф., Трошкин А.М., Батрак П.И., Патий В.В. Больше воды – меньшими затратами // Городское хозяйство Украины. 1983. №1(82). С. 15.
22. Хомуецька Т.П. Методика розрахунку автоматизованих систем подачі води із шахтних колодязів // Меліорація і водне господарство. Випуск 99. Киев: Аграрна наука, 2011. С. 200–214.
23. Белан А.Е., Хоружий П.Д. Проектирование и расчет устройств водоснабжения. Киев: Будівельник, 1981. 312 с.
24. Рекомендации по инженерному оборудованию сельских населенных пунктов. Ч.2. Водоснабжение / ЦНИИЭП инженерного оборудования. М: Стройиздат, 1984. 80 с.
25. Оводов В.С. Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение. М.: Колос, 1984. 480 с.
26. Николадзе Г.И., Сомов М.А. Водоснабжение. М.: Стройиздат, 1995. 688 с.
27. Журба М.Г. Сельскохозяйственное водоснабжение. Кишинев: Universitas, 1991. 284 с.
28. Супрун А.Н., Найдено В.В. Вычислительная математика для инженеров-экологов: Методическое пособие. М.: АСВ, 1996. 391 с.
29. Сомов М. А., Журба М. Г. Водоснабжение. В 2 т. Т. 1. Системы забора, подачи и распределения воды. М.: Изд-во АСВ, 2008. Рр. 210–220.
30. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий: Справочник проектировщика / Под ред. И.А. Назарова. М.: Стройиздат, 1976. 248 с.
31. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. М.: Стройиздат, 1973. 113 с.
32. Державні будівельні норми України: ДБН.В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Введ. 01.03.13, 2013. 181 с.

*Ольга Юрьевна Поберезниченко, г.Киев, Украина  
+38(097)9264877; эл. почта: olia-olena@ukr.net*

*Татьяна Петровна Хомуецкая, г.Киев, Украина  
+38(063)0520291; эл. почта: itsk@bigmir.net*

© Поберезниченко О.Ю., Хомуецкая Т.П., 2014

doi: 10.5862/MCE.46.7

## Calculation method and operation optimization of water supply and distribution systems equipped with water wells

**O.Y. Pobereznichenko***Institute of Water Problems and Land Reclamation, Kyiv, Ukraine  
+38(097)9264877; e-mail: olia-olenia@ukr.net***T.P. Homutetskaya***Institute of Water Problems and Land Reclamation, Kyiv, Ukraine  
+38(063)0520291; e-mail: itsk@bigmir.net*

### Key words

water supply and distribution systems; efficient use of resources; hydraulic resistance; head loss; specific energy consumption

### Abstract

In the paper, there has been proposed a method of hydraulic and feasibility studies for water systems equipped with water wells which allows determining the optimal set of system structures and the most efficient regimes of their joint performance during operation.

Some of the most difficult for hydraulic and feasibility calculations are water supply and distribution systems (hereinafter - SPRV), which contain water wells with borehole pumps. When designing new systems, setting up newly built ones and reconstructing the existing systems, it is necessary to choose the optimal set of structures, their optimal sizes and the most efficient regime of their joint performance.

Currently, such systems are the most common for the underground water intake, and the complexity of the optimization calculations of their interacting structures joint performance, is accounted for with the need to specify the characteristics of all wells, their mutual interdependence, and the changes of their characteristics during operation.

### References

1. Alexander S.M., Glenn N.L., Bird D.W. Advanced techniques in the mathematical modeling of waterdistribution systems. *Journal – American Water Works Association*. 1975. Vol. 67. No.7. Pp. 20–26.
2. Khoruzhiy P. D. *Raschet gidravlicheskogo vzaimodeystviya vodoprovodnykh sooruzheniy* [Calculation of hydraulic interaction waterworks]. Lvov: Vishcha shkola, izd-vo pri Lvov. un-te, 1983. 152p. (rus)
3. Ramezani Etedali H., Liaghat A., Parsinejad M., Tavakkoli A.R., Bozord Haddad O., Ramezani Etedali M. Water allocation optimization for supplementary irrigation in rainfed lands to increase total income case study: upstream Kerkheh River basin. *Irrigation and Drainage*. 2013. Vol. 62. No.1. P. 74–83.
4. Appleyard J.R. Optimal design of distribution networks. *Building Services Engineer*. 1978. Vol. 45. No. 10. Pp. 18–24.
5. Clark R.M. Water supply economics. *Journal of the Urban Planning and Development Division*. 1976. Vol. 102. No. 1. Pp. 213–224.
6. Robino P., Stellacci A.M., Rana R.M., Catalano M., Caliendo A. A Non-Linear model for optimal allocation of irrigation water and land under adequate and limited water supplies: a case study in Southern Italy. *Irrigation and Drainage*. 2013. Vol. 62. No. 2. Pp. 145–155.
7. Choi J.-D, Lim K.-J., Won C.H. Catchment water quality management planning for sustainable development of Tidal Areas. *Irrigation and drainage*. 2013. Vol. 62. Supplement S1. Pp. 18–23.
8. Kikacheyshvili G. Ye. *Metodologiya optimizatsii sistem podachi i raspredeleniya vody* [Methodology optimization of water supply and distribution]. Tbilisi: Iz-vo «Tekhnicheskiiy universitet», 2002. 180 p. (rus)
9. Karambirov S.N. *Sovershenstvovaniye metodov rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody v usloviyakh mnogorezhimnosti i nepolnoy iskhodnoy informatsii* [Improvement of methods of calculation and distribution systems to deliver water under multimodiness and incomplete initial information]. Abstract of PhD thesis. Moscow, 2005. 46 p. (rus)
10. Kozhinov I.V., Kolesov V.V., Mayzels M.P., Egilskiy I.S. *Naladka i intensifikatsiya raboty gorodskikh sistem podachi i raspredeleniya vody* [Adjustment and intensification of urban systems, water supply and distribution]. Moscow: Stroyzdat, 1978. 112 p. (rus)

Pobereznichenko O.Y., Homutetskaya T.P. Calculation method and operation optimization of water supply and distribution systems equipped with water wells

11. Mityanin V.M. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. 1980. No. 2. P. 27. (rus)
12. Bhave P.R. Noncomputer optimization of single-source networks. *Journal of the Environmental Engineering Division*. 1978. Vol. 104. No. 4. Pp. 799–814.
13. Cenedese A., Mele P. Optimal design of water distribution networks. *Journal of the Hydraulics Division*. 1978. Vol. 104. No. 2. Pp. 237–247.
14. Collins A.G., Jonson R.L. Finite – element method for water-distribution networks. *Journal – American Water Works Assosiation*. 1975. Vol. 67. No. 7. Pp. 12–16.
15. *Rekomendatsii po sokrashcheniyu poter vody v zhilishchnom khozyaystve* [Recommendations to reduce water losses in housing]. Moscow: ONTI AKKh, 1977. 27 p. (rus)
16. Egil'skiy I.S. Kozhinov I.V. *Intensifikatsiya i optimizatsiya gorodskikh i promyshlennykh vodoprovodov. Materialy seminar* [Intensification and optimization of urban and industrial aqueducts. Proceedings of the seminar]. Moscow: MDNTP, 1973. Pp. 3–9. (rus)
17. Abramov N. N. *Vodosnabzheniye: Uchebnyk dlya vuzov* [Water supply: Textbook for universities]. Moscow: Stroyizdat, 1982. 440 p. (rus)
18. Abramov N. N., Pospelova M. M., Somov M. A. [et al]. *Raschet vodoprovodnykh setey: Uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Calculation of pipeline network: A manual for higher school]. Moscow: Stroyizdat, 1983. 278 p. (rus)
19. Abramov N. N. *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody* [Theory and methods of calculation systems water supply and distribution]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 288 p. (rus)
20. Khoruzhiy P.D., Khomutetska T.P., Khoruzhiy V.P. *Resursozberigayuchi tekhnologii vodopostachannya* [Resource-saving technologies of water supply]. Kyiv: Agrarna nauka, 2008. 534 p. (ukr)
21. Khoruzhiy P.D., Khudoba P.F., Troshkin A.M., Batrak P.I., Patiy V.V. *Bolshe vody – menshimi ztratami. Gorodskoye khozyaystvo Ukrainy*. 1983. No. 1(82). P. 15. (rus)
22. Khomutetska T.P. *Melioratsiya i vodne gospodarstvo*. Vol. 99. Kiyev: Agrarna nauka, 2011. Pp. 200–214. (ukr)
23. Belan A. E., Khoruzhiy P. D. *Proyektirovaniye i raschet ustroystv vodosnabzheniya* [Design and calculation of water supply devices]. Kyiv: Budivelnik, 1981. 312 p. (rus)
24. *Rekomendatsii po inzhenernomu oborudovaniyu selskikh naselennykh punktov* [Recommendations for engineering equipment villages]. Part 2. Moscow: Stroyizdat, 1984. 80p. (rus)
25. Ovodov B. C. *Selskokhozyaystvennoye vodosnabzheniye i obvodneniye* [Agricultural water supply and flooding]. Moscow: Kolos, 1984. 480 p. (rus)
26. Nikoladze G.I., Somov M.A. *Vodosnabzheniye* [Water supply]. Moscow: Stroyizdat, 1995. 688 p. (rus)
27. Zhurba M. G. *Selskokhozyaystvennoye vodosnabzheniye* [Agricultural water supply]. Kishinev: Universitas, 1991. 284 p. (rus)
28. Suprun A. N., Naydenko V. V. *Vychislitel'naya matematika dlya inzhenerov-ekologov: Metodicheskoye posobiye* [Computational Mathematics for environmental engineers: Toolkit]. Moscow: Izd-vo ASV, 1996. 391 p. (rus)
29. Somov M.A., Zhurba M.G. *Vodosnabzheniye. V 2 t. T. 1. Sistemy zabora, podachi i raspredeleniya vody* [Water supply. In 2 vol. Vol. 1. Systems of fence, supply and distribution of water]. Moscow: Izd-vo ASV, 2008. Pp. 210–220. (rus)
30. *Vodosnabzheniye naselennykh mest i promyshlennykh predpriyatiy: Spravochnik proyektirovshchika* [Fence system, water supply and distribution]. Edited by I.A. Nazarov. Moscow: Stroyizdat, 1976. 248 p. (rus)
31. Shevelev F.A. *Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta stalnykh, chugunnykh, asbestotsementnykh, plastmassovykh i steklyannykh vodoprovodnykh trub* [Tables for the hydraulic calculation of steel, cast iron, asbestos cement, plastic and glass water pipes]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 113 p. (rus)
32. *Derzhavni budivelni normi Ukraini: DBN.V.2.5-64:2012. Vnutrishniy vodoprovod ta kanalizatsiya* [State building codes of Ukraine: DBN.V.2.5 -64: 2012. Domestic water supply and sewerage]. March 1, 2013. 181 p. (ukr)

**Full text of this article in Russian: pp. 58–64**