

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>

УДК 628.112

Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов

В. В. Верemenюк¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, В. И. Крицкая¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Аннотация. Скважинные водозаборы подземных вод широко используются для водоснабжения агрогородков, городских поселков, малых и крупных городов, мегаполисов. Численность потребителей в указанных населенных пунктах определяет количество водозаборов, число скважин водозабора, их производительность, схемы расположения и подключения к сборным водоводам. В связи с увеличением масштабов использования подземных вод производятся реконструкция и расширение действующих водозаборов. Эти работы сопровождаются тампонажем вышедших из строя скважин, их перебуриванием, бурением дополнительных скважин, перекладкой старых и прокладкой новых сборных водоводов. Все это приводит к усложнению конфигурации сборных водоводов из-за строительства переемычек и колец, появлению новых скважин с линиями подключения. В новых условиях, чтобы правильно установить режимы работы водозабора с минимальными затратами энергии на подъем и подачу заданного объема воды в сборно-регулирующие резервуары, верно выбрать соответствующее водоподъемное оборудование в скважинах, разработать мероприятия по интенсификации водозабора с прогнозом их эффективности и оптимизировать работу водозабора, необходимо построить его математическую модель, позволяющую выполнять комплексные расчеты. Самыми сложными для создания математической модели являются водозаборы с разветвленными сборными водоводами, а также с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Методика расчета подобных водозаборов недостаточно освещена в литературе, отсутствуют конкретные примеры расчета. Целью настоящей статьи является уточнение методики расчета скважинных водозаборов с разветвленными сборными водоводами и с кольцевой схемой их соединения.

Ключевые слова: водозабор подземных вод, водоснабжение, разветвленные сборные водоводы, математическая модель водозабора, удельный дебит скважин

Для цитирования: Верemenюк, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 67/2,
220065, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Address for correspondence

Ivashechkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
67/2, Nezavisimosty Ave.,
220065, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits

V. V. Veremenyuk¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, V. I. Krytskaya¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Borehole water intakes of underground water are widely used for water supply of agricultural towns, urban settlements, small and large cities and megacities. The number of consumers in these localities determines the number of water intakes, the number of wells, their productivity, location and connection to the prefabricated water conduits. Due to the increase in the use of underground water, the existing water intakes are being reconstructed and expanded. These works are accompanied by grouting of failed wells, their re-drilling, drilling of additional wells, re-laying of old and laying of new prefabricated water conduits. All this causes the complexity of the configuration of prefabricated water conduits due to the construction of jumpers and rings, the emergence of new wells with connection lines. Under the new conditions, in order to properly develop water intake operating modes which meet the minimum energy consumption for lifting and delivering a required volume of water to the collection-and-control tanks, to accurately choose the appropriate water lifting equipment in wells, to develop measures for intensifying water intake alongside with a forecast of their efficiency and to optimize the operation of the water intake, it is necessary to create its mathematical model that allows performing complex calculations. Water intakes with ramified prefabricated water conduits, as well as with an area scheme of the location of wells and a ring scheme of the connection of prefabricated water conduits are the most difficult object for mathematical modeling. The methods of calculating such water intakes are not sufficiently reflected in the literature, and there are no specific examples of calculation. The present article aims to clarify the methodology for calculating borehole water intakes with ramified prefabricated water conduits and with a ring scheme of their connection.

Keywords: borehole groundwater intake, water supply, ramified prefabricated water conduits, mathematical model of water intake, specific flow rate of wells

For citation: Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian)

Введение

Скважинные водозаборы подземных вод при наличии хорошей защиты от загрязнения широко используются для водоснабжения агрогородков, городских поселков, малых и крупных городов, мегаполисов. Численность потребителей в указанных населенных пунктах определяет количество водозаборов, число скважин водозабора, их производительность, схемы расположения и подключения к сборным водоводам. В связи с увеличением масштабов использования подземных вод как более качественных по сравнению с поверхностными водами производятся реконструкция и расширение действующих водозаборов подземных вод. Эти работы сопровождаются тампонажем вышедших из строя скважин, их переобустройством, бурением дополнительных скважин, перекладкой старых и прокладкой новых сборных водоводов. Все это приводит к усложнению конфигурации сбор-

ных водоводов из-за строительства перемычек и колец, появления новых скважин с линиями подключения. В новых условиях, чтобы правильно установить режимы работы водозабора с минимальными затратами энергии на подъем и подачу заданного объема воды в сборно-регулирующие резервуары, верно выбрать соответствующее водоподъемное оборудование в скважинах, разработать мероприятия по интенсификации водозабора с прогнозом их эффективности и оптимизировать работу водозабора, необходимо построить его математическую модель, позволяющую выполнять комплексные расчеты.

Расчетам притока воды к скважинам и комплексным расчетам водозаборов подземных вод посвящены работы Ф. М. Бочевера, А. И. Арцева, В. С. Алексеева, Н. А. Плотникова, В. П. Старинского, А. Д. Гуриновича и др. [1–6]. Согласно [7], скважинные водозаборы условно разделяют по сложности обвязки скважин водоводами на следующие типы: 1) линейный ряд скважин (одна ветвь скважин) и один сборный водовод; 2) два или более линейных ряда скважин и их сборные водоводы; 3) площадная схема расположения скважин и кольцевая схема соединения сборных водоводов. Говоря упрощенно, первый тип – это линейные водозаборы; второй – водозаборы с разветвленными сборными водоводами, а третий – водозаборы с кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Таким образом, второй и третий типы можно условно отнести к нелинейным водозаборам.

Методика расчета линейного водозабора широко освещена в литературе.

Более сложным с точки зрения расчета является водозабор, имеющий несколько ветвей. Методика расчета должна учитывать взаимосвязь ветвей скважин в системе уравнений, описывающих водозабор.

Наконец самыми сложными для создания математической модели являются водозаборы с разветвленными сборными водоводами, а также с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Методика расчета таких водозаборов недостаточно освещена в литературе, конкретные примеры расчета отсутствуют.

Большинство научных работ посвящено проектированию новых водозаборов подземных вод, когда на основе материалов технического задания и данных гидрогеологических изысканий проектируются водозаборные скважины на заданную производительность, разрабатывается расчетная схема расположения скважин и сбора воды. В частности, в [1–6] изложены с примерами комплексные расчеты в основном простейших линейных водозаборов, только теоретически рассмотрено влияние кольматажа фильтров скважин на изменение производительности проектируемого водозабора во времени с целью обоснования сроков проведения его ремонта. В этой связи приобретает актуальность задача создания математической модели действующего водозабора, а не проектируемого, исходными данными для которого являются материалы натурного обследования: расчетная схема расположения скважин и сбора воды, фактические параметры пластов, характеристики скважин, насосного оборудования, параметры

трубопроводов, фактическое взаимовлияние скважин. Чтобы адаптировать разработанную математическую модель к реальным условиям, необходимо корректировать, проверять ее адекватность с учетом фактических значений напоров в узлах сборных водоводов и дебитов скважин.

Целью настоящей статьи является уточнение методики расчета скважинных водозаборов с разветвленными сборными водоводами и с кольцевой схемой их соединения.

Основная часть

Рассмотрим алгоритмы и примеры расчета указанных выше типов водозаборов.

Алгоритм расчета скважинных водозаборов с разветвленными сборными водоводами. Расходы скважин находят на основе решения системы уравнений динамического равновесия водозабора [5]. В состоянии динамического равновесия водозабор находится тогда, когда напор H_n^H каждого установленного в скважине насоса численно равен потребному напору $H_{n\text{потр}}^c$ в трубопроводе, соединяющем скважинный насос с резервуарами чистой воды (РЧВ) или станцией обезжелезивания (СОЖ). Число уравнений системы равно количеству скважин N линейного водозабора.

$$\left\{ \begin{array}{l} H_1^H - H_{1\text{потр}}^c = 0; \\ \dots\dots\dots \\ H_n^H - H_{n\text{потр}}^c = 0; \\ \dots\dots\dots \\ H_N^H - H_{N\text{потр}}^c = 0. \end{array} \right\}. \quad (1)$$

В водозаборах с несколькими ветвями скважин эти равенства, входящие в систему уравнений, группируют по ветвям водозабора в зависимости от характера их взаимосвязи.

Уравнение для n -й скважины водозабора имеет вид

$$H_n^H = S_n + H_{\text{ст.}n} + Z_n + \Delta H_n, \quad (2)$$

где S_n – понижение в скважине; $H_{\text{ст.}n}$ – расстояние от устья скважины до статического уровня; Z_n – геометрический напор; ΔH_n – суммарные потери напора в колонне водоподъемных труб, линии подключения к сборному водоводу и на участке сборного водовода от точки подключения до РЧВ (СОЖ).

Насос скважины развивает напор в соответствии с рабочей характеристикой, которая может быть аппроксимирована квадратичной функцией:

$$H_n^H = -a_n Q^2 + b_n Q + c_n, \quad (3)$$

где c_n – некоторый фиктивный напор насоса; $a_n > 0$ и b_n – коэффициенты кривой $H_n^H(Q)$ насоса, характеризующие его фиктивное гидравлическое сопротивление.

В общем случае переменное в процессе эксплуатации понижение в n -й скважине $S_n(t)$ может быть представлено в виде

$$S_n(t) = S_{0n} + \Delta S_{к.н}(t) + \Delta S_{вл.н} + \Delta S_{ср.н}(t), \quad (4)$$

где S_{0n} – понижение уровня в самой скважине в условиях ее одиночной работы без учета кольматационных процессов; $\Delta S_{к.н}(t)$ – дополнительное понижение уровня в данной скважине, обусловленное химическим кольматацией фильтра и прифильтровой зоны, происходящим во времени; $\Delta S_{вл.н}$ – понижение (срезка) уровня в данной скважине, обусловленное влиянием всех совместно работающих скважин; $\Delta S_{ср.н}(t)$ – дополнительное понижение уровня в n -й скважине, происходящее с течением времени в результате общей работы запасов подземных вод в пласте.

Понижение уровня S_{0n} в самой скважине найдем через ее удельный дебит q_n , измеренный в момент обследования:

$$S_{0n} = \frac{Q_n}{q_n}, \quad (5)$$

где Q_n – дебит скважины.

Удельный дебит скважины $q_n(t)$ снижается в процессе эксплуатации вследствие кольматации и может быть представлен эмпирической зависимостью, предложенной в [8]:

$$q_{к.н}(t) = q_n e^{-\beta t}, \quad (6)$$

где β – коэффициент старения скважины, учитывающий снижение ее удельной производительности вследствие химического кольматации фильтра и прифильтровой зоны; t – рассматриваемый промежуток времени от момента обследования скважины. Значение коэффициента β определяют по результатам замеров удельного дебита от момента сооружения скважины.

Дополнительное понижение уровня $\Delta S_{к.н}$ в данной скважине, обусловленное химическим кольматацией фильтра и прифильтровой зоны, найдем как разность понижений в самой скважине в процессе работы в условиях кольматации через промежуток времени t и на момент обследования ($t = 0$), т. е. с учетом (5) и (6)

$$\Delta S_{к.н} = \frac{Q_n}{q_{к.н}(t)} - \frac{Q_n}{q_n} = \frac{Q_n}{q_n} (e^{\beta t} - 1). \quad (7)$$

Экспериментальное значение сниженного удельного дебита скважины $q_{\text{вл.}n}$ в результате влияния взаимодействующих с ней скважин может быть определено по методу М. Е. Альтовского [9]

$$q_{\text{вл.}n} = q_n (1 - \alpha_n), \quad (8)$$

где $\alpha_n = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq n}}^N \alpha_{j,n}$ – суммарный коэффициент снижения дебита, равный сумме

коэффициентов снижения дебита $\alpha_{j,n}$ влияния всех j -х скважин, взаимодействующих с n -й скважиной; q_n – удельный дебит скважины на момент обследования при ее одиночной работе.

Коэффициенты снижения дебита α_n определяются по данным откачек во время обследования водозабора.

Срезку уровня $\Delta S_{\text{вл.}n}$ в данной скважине, обусловленную влиянием всех совместно работающих с ней скважин, найдем как разность понижений в самой скважине при совместной работе со всеми взаимодействующими с ней скважинами и при ее одиночной работе, т. е. с учетом (5) и (8)

$$\Delta S_{\text{вл.}n} = \frac{Q_n}{q_{\text{вл.}n}} - \frac{Q_n}{q_n} = \frac{Q_n}{q_n} \left(\frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right). \quad (9)$$

Теоретически срезка уровня $\Delta S_{\text{вл.}n}$ при произвольном расположении скважин в неограниченном напорном пласте может быть определена по формуле Форхгеймера [1]

$$\Delta S_{\text{вл.}n} = \frac{\sum_{j=1}^p \nabla Q_j \ln \left(\frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km}, \quad (10)$$

где p – число воздействующих скважин; Q_j – производительность воздействующей скважины; R_j – радиус влияния воздействующей скважины; r_{jn} – расстояние между рассматриваемой и воздействующей скважинами; ∇ – индекс, указывающий на то, что из суммы исключен член $j = n$; k – коэффициент фильтрации; m – мощность пласта.

Величиной $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$ в пластах с постоянно действующими источниками восполнения запасов подземных вод (реками, водохранилищами) и при наличии гидравлической связи с другими водообильными горизонтами пренебрегают, поскольку фильтрация в этих случаях приобретает установившийся характер. В процессе длительной эксплуатации водозабора величина $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$ уменьшается, и ее можно не учитывать, так как фильтрация воды к водозабору приобретает установившийся характер. Кроме того, измеряемое во время обследования водозабора значение понижения уровня S_{0n} в каждой скважине уже учитывает сработку запасов $\Delta S_{\text{ср.}n}(T_э)$ под-

земных вод за период эксплуатации T_3 (время от сооружения скважины до момента ее обследования) [1].

При обследовании водозабора, характеризующегося неустановившейся фильтрацией, для нахождения $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$ можно использовать данные эксплуатационных журналов каждой скважины и построить графики $\Delta S_{\text{ср.}n}(t) = f(Q_i, t)$, где $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$ – дополнительное понижение уровня при постоянном расходе Q_i [1]. Эти кривые затем можно аппроксимировать эмпирическими зависимостями и подставить в выражение (4).

Приближенно расчет дополнительного понижения уровня $\Delta S_{\text{ср.}n}(t)$ в скважине в результате сработки запасов подземных вод за период времени t (сутки) от момента ввода в эксплуатацию (проведения обследования) можно рассчитать по формуле [1]:

$$\Delta S_{\text{ср.}n}(t) = -\frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{4\pi km} E_n(-\lambda_n), \quad (11)$$

где $\sum_{n=1}^N Q_n$ – производительность водозабора; $E_n(-\lambda_n)$ – интегральная показательная функция; λ_n – параметр, зависящий от типа пласта, коэффициента пьезопроводности a водовмещающих пород, времени эксплуатации водозабора t , расстояния $r_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$ от центра водозабора до рассматриваемой водозаборной скважины с координатами x_n и y_n .

Для неограниченных напорных пластов без площадного питания

$$\lambda_n = \frac{r_n^2}{4at}. \quad (12)$$

При $\frac{r_n^2}{4at} < 0,1$ интегральная показательная функция $E_n(-\lambda_n)$ с необходимой практической точностью представляется в виде логарифма

$$E_n(-\lambda_n) = -\ln \frac{2,25at}{r_n^2}. \quad (13)$$

Окончательно из (11)–(13) имеем

$$\Delta S_{\text{ср.}n}(t) = \frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2}. \quad (14)$$

Подставив (5), (7), (9) и (14) в (4), получим

$$S_n(t) = \frac{Q_n}{q_n} \left(e^{\beta t} + \frac{1}{(1-\alpha_n)} - 1 \right) + \frac{\sum_{n=1}^N Q_n}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2}. \quad (15)$$

Подставив в уравнение (2) выражения (3) и (15), получим

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_n} \left(e^{\beta t} + \frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right) + \frac{\sum_{j=1}^N Q_j}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2} + H_{ст.н} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0. \quad (16)$$

Если учитывать взаимодействие скважин по формуле Форхгеймера (10), уравнение (16) примет вид

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n e^{\beta t}}{q_n} + \frac{\sum_{j=1}^p Q_j \ln \left(\frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km} + \frac{\sum_{j=1}^N Q_j}{4\pi km} \ln \frac{2,25at}{r_n^2} + H_{ст.н} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0. \quad (17)$$

В случае, когда не требуется выполнять прогнозный расчет водозабора (т. е. $t = 0$), уравнения (16) и (17) принимают следующий вид:

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_n(1 - \alpha_n)} + H_{ст.н} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0; \quad (18)$$

$$a_n Q_n^2 - b_n Q_n + \frac{Q_n}{q_n} + \frac{\sum_{j=1}^p Q_j \ln \left(\frac{R_j}{r_{jn}} \right)}{2\pi km} + H_{ст.н} + Z_n + \Delta H_n - c_n = 0. \quad (19)$$

Анализ уравнений (16)–(19) показывает, что чем меньше удельный дебит скважин q_n и больше расстояние от устья скважины до статического уровня H_n , тем больше понижение в скважине и дополнительный геометрический напор, преодолеваемый насосом, и, следовательно, выше удельные энергозатраты на подачу воды в резервуары. Это позволяет ранжировать все скважины водозабора по удельным энергозатратам и экономить электроэнергию [10].

Система уравнений вида (1) решается итерационными методами, определяются дебиты скважин, напоры в узлах сборного водовода. Затем надо выполнить проверку адекватности математической модели, а далее производится ее корректировка с учетом фактических значений напоров в узлах сборных водоводов и дебитов скважин.

Пример. Скважинный водозабор (рис. 1) представлен восьмью водозаборными скважинами, имеет разветвленную схему соединения сборных водоводов с двумя ветвями, подключен к водонапорной башне, находящейся на входе в водопроводную сеть города [11–13]. Скважи-

ны № 2, 3, 5 пробурены на днепровско-сожский водоносный комплекс, скважины № 4, 6, 7, 8, 9 – на альб-сеноманские отложения. Фактическое водопотребление населенного пункта $Q_s = 4500 \text{ м}^3/\text{сут}$. Требуется на основе материалов обследования и комплексных расчетов проанализировать режим эксплуатации водозабора с учетом фактической интенсивности кольматажа скважин [14], определить межремонтный период его работы, осуществить подбор насосного оборудования.

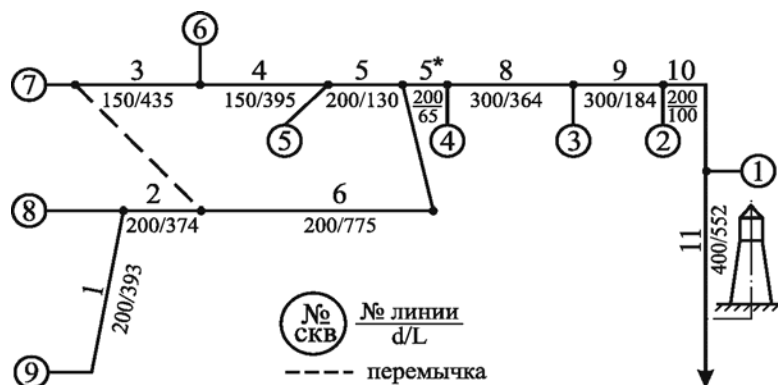


Рис. 1. Расчетная схема подключения скважин к сборному водоводу

Fig. 1. An estimated scheme of connecting wells to a prefabricated water conduit

Результаты обследования скважин представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обследования скважин водозабора

The results of water intake wells survey

Номер скважины	Удельный дебит при бурении q_0 , $\text{м}^2/\text{ч}$	Удельный дебит при обследовании q , $\text{м}^2/\text{ч}$	Время эксплуатации t_3 , лет	Коэффициент старения β	Геометрический напор Z , м	Глубина статического уровня $H_{\text{ст}}$, м	Длина водоподъемных труб l , м	Длина линии подключения l , м	Диаметр водоподъемных труб d' , мм	Диаметр линии подключения d , мм	Суммарный коэффициент снижения дебита $\sum \alpha$
2	2	1	7	0,041	40	17,5	66	30	75	75	0,10
3	1,57	0,80	21	0,032	39,5	15,0	50	30	75	75	0,10
4	4,50	3,00	16	0,025	43,6	38,7	66	30	100	100	0,03
5	1,33	0,78	10	0,053	45,0	16,0	67	20	100	100	0,01
6	1,00	0,60	5	0,100	45,5	40,0	83	40	75	75	0,04
7	1,50	0,80	5	0,126	46,4	43,7	66	150	100	150	0,10
8	1,90	1,60	3	0,057	49,5	41,8	61	10	100	100	0,10
9	3,70	2,40	3	0,144	52	39	61	393	100	200	0,05

Для каждой скважины осуществлялся предварительный подбор насосов графоаналитическим способом. Полученные расходы являлись предварительными для расчета системы нелинейных уравнений.

Порядок расчета имел следующий вид:

- на основе натурных данных, полученных при обследовании водозабора, составлялась система (1) нелинейных уравнений динамического равновесия водозабора вида (16) с учетом факторов кольматации скважин и их взаимного влияния; в уравнение для скважины № 9 потери напора подставлялись для участков 1–2–6–5*–8–9–10–11; для скважины № 8 – для участков 2–6–5*–8–9–10–11; для скважины № 7 – для участков 3–4–5–5*–8–9–10–11; для скважины № 6 – для участков 4–5–5*–8–9–10–11, при этом расходы на участках 5*–8–9–10–11 при определении потерь напора включали подачи насосов скважин № 6, 7, 8, 9;

- составлялась программа расчета системы (1), ее решение осуществлялось на различные моменты времени с определением на каждом шаге по времени значений Q_n , ΣQ_i и проверкой выполнения условия $\Sigma Q_i > Q_s$;

- определялся по графику $\Sigma Q_i = f(t)$ при $\Sigma Q_i = Q_s = 4500 \text{ м}^3/\text{сут.}$ период T_s работы водозабора, который от момента обследования составил $T_s = 32$ месяца (2,67 года) (рис. 2). Промежуток времени T_s можно условно считать межремонтным периодом работы водозабора, это значит, что до момента его окончания необходимо предусмотреть комплекс мероприятий по регенерации скважин, снизивших свой удельный дебит.

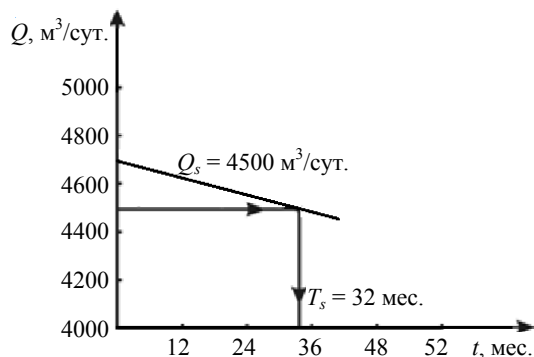


Рис. 2. Расчетный график изменения во времени суммарной производительности водозабора

Fig. 2. An estimated schedule of changes in the total water intake performance over time

Из данных рис. 2 следует, что суммарная производительность водозабора некоторое время после обследования превышает водопотребление населенного пункта, однако с ростом сопротивления фильтров скважин в результате кольматации происходит уменьшение удельного дебита скважин $q(t)$ и возрастают понижения $S(t)$, что приводит к уменьшению производительности водозабора.

Расчетные данные по выбранному водоподъемному оборудованию представлены в табл. 2.

Таблица 2

Водоподъемное оборудование и понижения в скважинах
Water-lifting equipment and depressions in wells

Номер скважины	Марка насоса	$t = 0$			$t = 2,67$ года		
		$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$H, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	$H, \text{ м}$	$S, \text{ м}$
1	1ЭЦВ8-25-100	27,54	94,80	30,35	26,62	96,69	32,72
2	1ЭЦВ8-25-100	26,20	97,53	36,40	25,40	99,11	38,41
3	ЭЦВ8-25-150	37,66	100,38	12,94	37,55	100,88	13,79
4	1ЭЦВ8-25-100	25,40	99,09	32,85	24,06	101,55	35,85
5	ЭЦВ8-25-150	26,40	145,30	45,88	24,21	152,36	54,90
6	ЭЦВ8-25-150	26,02	146,68	36,14	22,91	156,20	44,55
7	ЭЦВ8-25-150	32,57	122,67	22,88	31,90	125,30	26,10
8	ЭЦВ8-25-150	34,38	115,10	15,08	33,08	120,60	21,30

Алгоритм расчета режимов работы скважинных водозборов с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Изложение материала ведется на примере расчетов по предлагаемому алгоритму одного из скважинных водозборов г. Минска. Обобщение этого материала на другие водозборы с кольцевыми сборными водоводами достаточно очевидно для специалиста, но весьма громоздко для изложения.

Рассмотрим расчетную схему откачки воды из скважин группового водозабора с подачей в резервуар СОЖ (рис. 3).

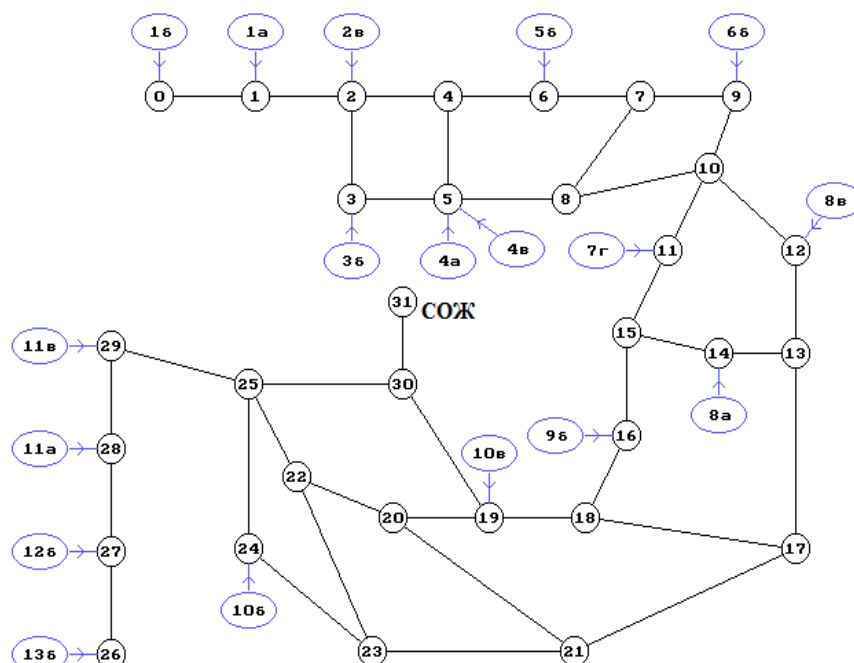


Рис. 3. Расчетная схема группового водозабора

Fig. 3. A group water intake estimated scheme

На рис. 3 кругами обозначены водопроводные колодцы, расположенные на сборном водоводе, ведущем к СОЖ. В дальнейшем будем их называть узлами водовода. Эллипсами обозначены 18 водозаборных скважин, подключенных к сборному водоводу в соответствующих узлах, их номера написаны внутри эллипсов. Как видно, схема соединения сборных водоводов имеет девять минимальных колец (т. е. не содержащих внутри себя других колец).

Гидравлический расчет группового водозабора столь сложной конфигурации должен проводиться как для системы с нефиксированными подачами воды, что требует выполнения следующих действий:

во-первых, учета баланса напоров потока в водоводе с включенным в него насосом, забирающим воду из n -й скважины водозабора (1), который описывается системой уравнений:

$$H(Q_n) = S_n + H_{\text{ст}_n} + Z_n + \Delta H_n, \quad n = 1, \dots, 18, \quad (20)$$

где $H(Q_n)$ – напор насоса при извлекаемом расходе воды Q_n ;

во-вторых, учета баланса расходов в узлах по всем участкам сборного водовода, который описывается системой уравнений:

$$Q_m + \sum_{k=1}^{n_m} \pm q_{mk} = 0, \quad m = 1, \dots, 31, \quad (21)$$

m – число узлов сборного водовода; Q_m – подача воды в рассматриваемый узел подключенной к нему скважиной (если таковой нет, то считаем $Q_m = 0$); n_m – число сходящихся в данном узле линий сборного водовода; $\pm q_{mk}$ – расходы воды в линиях, примыкающих к данному узлу, с учетом знаков (при подводе к узлу – знак «плюс», при отводе – знак «минус»).

Под словами «расчет водозабора» понимается задача определения таких извлекаемых расходов воды Q_n из скважин и таких расходов воды $\pm q_{mk}$ на участках сборного водовода, чтобы выполнялись системы уравнений (20) и (21) для существующих параметров скважинного водозабора (диаметр, длина и материал труб, характеристики насосов, параметры скважин и т. д.).

Определение расходов воды в линиях водовода при известных расходах в скважинах. Отметим, что если известны значения Q_m в левых частях системы уравнений (21), то эта система является автономной, т. е. не зависящей от системы (20). Но система уравнений (21) для рассматриваемого сборного водовода даже при известных расходах Q_m в узлах имеет бесконечное множество решений, что связано с наличием колец на водоводе. Это следует из известных теорем линейной алгебры, а также подтверждается дальнейшими рассуждениями.

Чтобы избежать ситуации неопределенности, мы потребовали выполнения на кольцевых участках сборного водовода естественного условия: если из одного узла A вода может прийти в узел B двумя различными путями (при этом подразумевается, что для каждого пути направления движения воды для соседних участков совпадают), то суммы потерь напора по этим путям должны быть равны. Например, из узла 2 в узел 4 можно

попасть (рис. 3) либо по пути 2–4, либо по пути 2–3–5–4. Слова о совпадении направлений движения поясним так: говорим, что направления движения по участку $m-n$ и по соседнему участку $n-k$ совпадают, если по первому из них вода втекает в узел n , а по другому – вытекает из этого узла.

Для математического описания этих условий введем обозначения: $q_{k,m}$ – алгебраический (т. е. с учетом знака) расход воды на простом участке $k-m$ водовода. Слова «простой участок» означают, что между узлами с номерами k и m нет других узлов. Если значение $q_{k,m}$ положительное, то движение воды происходит в сторону уменьшения расстояния до СОЖ, и в противоположную сторону – для отрицательного значения $q_{k,m}$. Например, для рассматриваемого водовода при $q_{22,25} > 0$ движение воды происходит от узла 22 к узлу 25, а при $q_{22,25} < 0$ – от узла 25 к узлу 22.

Потери напора $\Pi_{k,m}(q)$ на участке $k-m$ считаем с учетом знака расхода q на этом участке, т. е. $\Pi_{k,m}(q) = q^2 G_{k,m}$, если $q > 0$, и $\Pi_{k,m}(q) = -q^2 G_{k,m}$, если $q < 0$. Здесь $G_{k,m}$ – сумма коэффициентов гидравлического сопротивления (КГС) участков сборного водовода от k -го до m -го узла.

Теперь вводим дополнительные неизвестные по количеству минимальных колец на водоводе и составляем для них уравнения согласно требованиям, описанным выше. На рассматриваемом водозаборе имеем девять минимальных колец (рис. 3) и для них вводим переменные: x_1 – расход на участке 2–3; x_2 – то же на участке 4–5; x_3 – то же на участке 7–8; x_4 – то же на участке 10–11; x_5 – то же на участке 15–14; x_6 – то же на участке 17–18; x_7 – то же на участке 20–21; x_8 – то же на участке 22–23; x_9 – расход на участке 19–30. Надо отметить, что если найдем значения этих переменных, то, используя систему (21) и известные значения расходов Q_m , определим все нужные расходы $q_{k,m}$ на участках водовода. Кстати, это как раз и подтверждает, что система (21) имеет бесконечно много решений.

Для неизвестных x_m составляем систему уравнений согласно требованиям баланса потерь, описанным ранее. Например, используя введенные обозначения и систему (21), для исследуемого водовода имеем (ниже приведены уравнения для двух минимальных колец, для остальных семи – аналогично):

$$\text{– для кольца 2–3–5–4: } \Pi_{2,4}(\bar{Q}_{0,2} - x_1) + \Pi_{4,5}(x_2) = \Pi_{2,3}(x_1) + \Pi_{3,5}(Q_{36} + x_1);$$

$$\text{– для кольца 4–6–7–8–5: } \Pi_{4,6}(\bar{Q}_{0,2} - x_1 - x_2) + \Pi_{6,7}(\bar{Q}_{0,6} - x_1 - x_2) + \Pi_{7,8}(x_3) = \Pi_{4,5}(x_2) + \Pi_{3,5}(\bar{Q}_{3,8} + x_1 + x_2),$$

где $\bar{Q}_{0,2} = Q_{16} + Q_{1a} + Q_{2b}$; $\bar{Q}_{0,6} = \bar{Q}_{0,2} + Q_{56}$; $\bar{Q}_{3,8} = Q_{36} + Q_{4a} + Q_{4b}$ (напомним, что к узлу 5 подключены две скважины). Обозначение $Q_{имя}$ указывает на расход в скважине с соответствующим наименованием.

Полученную систему из m (m – количество минимальных колец водовода) нелинейных уравнений можно решить методом итераций, если разумно представить ее в виде $\bar{X} = F(\bar{X})$, где \bar{X} – столбец неизвестных, причем в качестве нулевого приближения можно взять нулевые значения

расходов x_m . Перед началом каждой следующей итерации надо делать пересчет КГС на простых участках с учетом скоростей на них (определяются полученной на текущей итерации величиной расхода на участке).

Для решения такой конкретной задачи для данного водозабора с точностью до 10^{-6} потребовалось около 10 итераций.

Отметим, что найденное распределение расходов $q_{k,m}$ на простых участках водовода обладает важным математическим свойством: для любого узла алгебраическая (с учетом знаков) сумма потерь при движении до СОЖ не зависит от пути движения по водоводу. Это играет важную роль при рассмотрении (20).

Определение добываемых расходов воды из скважин. Предположим, что для некоторого набора расходов $Q_n^{\text{стар}}$, $n = 1, \dots, 18$, мы выполнили вычисления, как это описано выше, и нашли распределение расходов $q_{k,m}$ на простых участках водовода. Для дальнейших выкладок надо подробно расписать (20). Для этого оговорим обозначения (далее $n = 1, \dots, 18$ – номер скважины):

a_n , b_n и c_n – коэффициенты функции напора (3) насоса n -й скважины в зависимости от извлекаемого расхода. Они определяются из паспорта насоса или экспериментально;

A_n – сумма удельных сопротивлений водоподъемных труб и линий подключения скважины к сборному водоводу, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

$$B_n = \frac{1}{q_n} \left(e^{\beta t} + \frac{1}{1 - \alpha_n} - 1 \right) - \text{коэффициент, позволяющий учесть старение}$$

скважины и ее взаимодействие с другими скважинами;

$C_n = H_{\text{ст}_n} + Z_n$, где $Z_n = \nabla_{\text{сож}} - \nabla_n + P_{\text{сож}}$ – геометрический напор, $\nabla_{\text{сож}}$ – отметка пола СОЖ, м; ∇_n – то же устья скважины, м; $P_{\text{сож}}$ – требуемый напор на СОЖ, м;

G_n – алгебраическая сумма потерь на участке водовода от скважины до СОЖ, м, найденная по распределению расходов $q_{k,m}$ на простых участках водовода.

Отметим, что значения удельного сопротивления для труб рассчитываются с использованием таблиц Шевелева [15] по диаметрам и материалам труб и с учетом поправочных коэффициентов, зависящих от скорости протекания воды по трубе, т. е. от текущих расходов, проходящих по трубе.

С учетом оговоренных обозначений (20) можно переписать в следующем виде:

$$(A_n + a_n)Q_n^2 + (B_n - b_n)Q_n + (C_n - c_n) + G_n = 0, n = 1, \dots, 18. \quad (22)$$

Применим (22) для нахождения новых значений расходов скважин $Q_n^{\text{нов}}$, $n = 1, \dots, 18$. Для этого используем формулу корней квадратного уравнения (с минусом перед корнем из дискриминанта). Если дискрими-

нант получается отрицательным, это означает неправильный подбор насосов или их большой износ.

Опишем алгоритм расчетов параметров работы скважинного водозабора.

0-й шаг. Задаем начальные приближения для столбца расходов скважин \bar{Q}^0 . Можно взять нулевые значения.

1-й шаг. Если значения столбца для i -го приближения \bar{Q}^i найдены, то, используя их, решаем систему (21) с максимально высокой точностью и находим алгебраические значения расходов $q_{k,m}$ на простых участках водовода. Применяя эти значения, пересчитываем необходимые КГС и алгебраические суммы потерь G_n по водоводу для (22) (напомним, что для найденных значений расходов на простых участках $q_{k,m}$ суммы G_n не зависят от пути движения от скважины до СОЖ).

2-й шаг. Используя (22), находим $(i + 1)$ -е приближение \bar{Q}^{i+1} и норму отклонения $\Delta_i = \|\bar{Q}^{i+1} - \bar{Q}^i\| = \sqrt{\sum (Q_n^{i+1} - Q_n^i)^2}$. Если отклонение меньше требуемой точности, заканчиваем работу, так как найдены нужные значения расходов Q_n и $q_{k,m}$, удовлетворяющие (20) и (21); в противном случае возвращаемся к шагу 1.

Нетрудно увидеть, что изложенный алгоритм годится и для водозаборов, рассмотренных выше. Только в этом случае при отсутствии колец (21) имеет однозначное решение, которое находится простым пересчетом по водоводам, начиная с дальних участков. А в (22) коэффициенты G_n представляют собой сумму потерь, вычисленную по однозначному пути, соединяющему скважину и СОЖ, и найденным расходам $q_{k,m}$ на простых участках.

На рис. 4 приведены результаты расчетов, выполненных с помощью этого алгоритма, для водозабора «Петровщина» при десяти включенных скважинах.

В табл. 3 представлены для сравнения реальные извлекаемые и расчетные расходы, указанные на рис. 4. Замеры извлекаемых расходов выполнены с привлечением системы АСУ водозабора.

Можно констатировать достаточно хорошее соответствие математической модели и выполненных замеров. Вместе с тем, поскольку по трем скважинам имеется завышение прогноза более чем на 4 %, был сделан повторный расчет с увеличением в исходных данных удельных сопротивлений для труб линий подключения трех скважин: 6б, 10б и 10в. В результате для этих скважин относительная ошибка оказалось в пределах 1,5 %, причем результаты улучшились и для скважин 1б и 7г. Относительная ошибка для суммарного расхода уменьшилась до 0,9 % – более чем в два раза. Это позволяет сделать заключение, что трубы линий подключения указанных трех скважин находятся не в лучшем состоянии и требуют по крайней мере очистки.

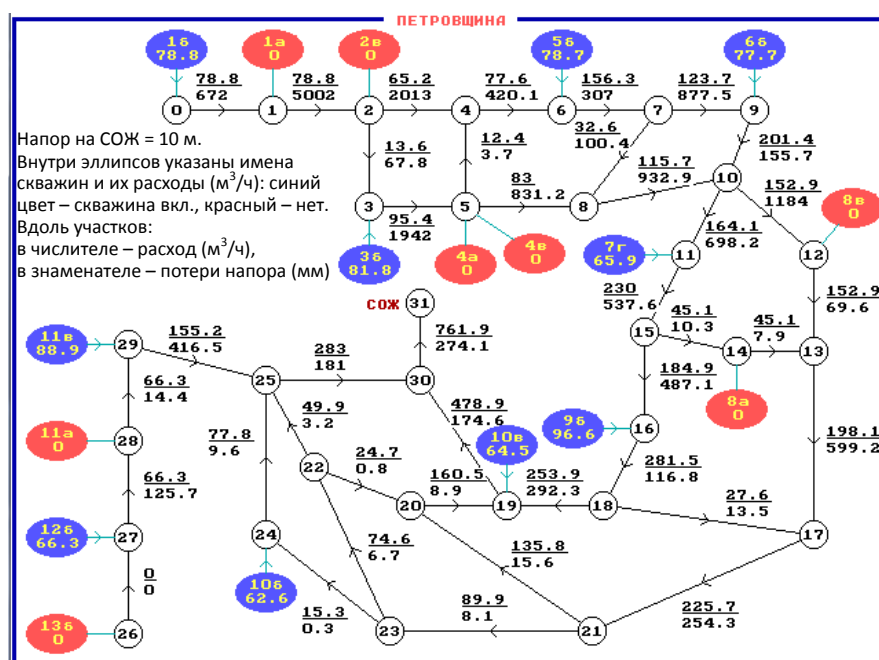


Рис. 4. Результаты расчета по (20), (21) с десятью работающими скважинами

Fig. 4. The calculation results for (20), (21) with ten operating wells

Таблица 3

Реальные и расчетные расходы скважин (рис. 4)

Comparison of real and estimated costs (Fig. 4)

Название скважины	16	36	56	66	7г	96	106	10в	126	11в	Сумма
Извлекаемый расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	79,6	80,00	78,60	74,4	66,000	96,00	60,5	59,5	64,7	88,0	747,3
Отклонение расчета от опыта, $\text{м}^3/\text{ч}$	-0,8	+1,80	+0,10	+3,3	-0,100	+0,60	+4,0	+3,1	+1,6	+0,9	+14,5
Относительная ошибка, %	1,0	2,25	0,01	4,4	0,015	0,06	6,6	5,2	2,4	1,0	1,9

Сказанное выше подтверждает, что качественное моделирование работы водозаборов с использованием приведенного алгоритма возможно только в случае наличия достоверных исходных данных относительно работы насосов, состояния труб линии подключения скважин к водоводу и труб самого водовода. В частности, анализ текущего состояния водозабора «Петровщина» потребовал внести коррективы в сторону увеличения в расчет удельных сопротивлений для труб линий подключения многих скважин. Кроме того, особенности конкретного водозабора требуют учета дополнительных потерь в правой части уравнения (20). К примеру, наличие в схеме водозабора «Петровщина» узла 10, где сходятся две линии (рис. 3, 4), потребовало прибавить к коэффициенту C_n в системе уравнений (22) коэффициент P (для скважин, расположенных выше этого узла) для учета дополнительных потерь напора, которые зависят от суммарного расхода, приходящего на этот узел. Значения этих дополнительных потерь рассчитывались исходя из опытных данных, на основании которых была

получена эмпирическая формула потерь $P = P(Q)$, где Q – приходящий на узел 10 расход воды.

ВЫВОДЫ

1. Уточнены методики расчета нелинейных водозаборов с несколькими ветвями скважин, с площадной схемой расположения скважин и кольцевой схемой соединения сборных водоводов. Уравнения для скважин системы динамического равновесия водозабора записаны с учетом дополнительных понижений, связанных со сработкой запасов подземных вод, кольматажем фильтров скважин во времени и взаимовлиянием скважин. Решение системы позволяет определить производительность каждой скважины при любом сочетании и количестве работающих скважин, правильно подобрать насосное оборудование, а также выполнить прогнозный расчет снижения производительности водозабора с учетом кольматажа и сработки запасов.

2. Разработаны алгоритмы расчета подобных водозаборов, которые могут быть использованы при создании математических моделей водозаборов любой конфигурации, проектируемых и находящихся в эксплуатации. Рассмотрены примеры расчетов скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами подключения скважин к сборным водоводам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование водозаборов подземных вод / А. И. Арцев [и др.]. М.: Стройиздат, 1976. 292 с.
2. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 334 с.
3. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02–84) / ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
4. Плотников, Н. А. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод / Н. А. Плотников, В. С. Алексеев. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.
5. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов: учеб. пособие / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. Минск: Выш. шк., 1989. 269 с.
6. Гуринович, А. Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения / А. Д. Гуринович. Минск: Технопринт, 2001. 305 с.
7. Скважинные водозаборы. Правила проектирования: ТКП 45-4.01-199–2010.
8. Гаврилко, В. М. Опыт эксплуатации скважин, оборудованных фильтрами из пористой керамики / В. М. Гаврилко, Н. Д. Бессонов // Труды ВНИИВодГео. 1966. Вып. 13. С. 8–10.
9. Дубровский, В. В. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / В. В. Дубровский, М. М. Керченский, В. И. Плохов. М.: Недра, 1972. 512 с.
10. Здор, Г. Н. Автоматическое управление группой насосных агрегатов с целью снижения затрат электроэнергии / Г. Н. Здор, А. В. Сеницын, О. А. Аврутин // Энергетика. Известия высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 54–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66>.
11. Ивашечкин, В. В. Прогноз периода стабильной работы скважинных водозаборов на основе результатов обследования / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, Г. К. Добрян // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2005. Т. 17, № 7. С. 199–209.
12. Ивашечкин, В. В. К расчету межремонтных периодов работы скважинных водозаборов с учетом старения скважин / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко // Вестник БНТУ. 2006. № 5. С. 5–10.
13. Ивашечкин, В. В. Прогноз снижения удельного дебита скважин в процессе эксплуатации / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, Э. И. Михневич // Мелиорация. 2012. № 2. С. 33–43.

14. Иванова, И. Е. Теоретические исследования процесса выщелачивания кольматанта в гравийной обсыпке фильтра скважины при использовании установки для реверсивно-реагентной регенерации / И. Е. Иванова, В. В. Ивашечкин, В. В. Верemenюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92>.
15. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособие / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. М.: Бастет, 2016. 428 с.

Поступила 10.04.2020 Подписана в печать 16.06.2020 Опубликована онлайн 30.11.2020

REFERENCES

1. Artsev A. I., Bochever F. M., Lapshin N. N., Oradovskaya O. E., Khokhlatov E. M. (1976) *Design of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 292 (in Russian).
2. Gavrilko V. M., Alekseev V. S. (1985) *Drill Well Filters*. 3rd ed. Moscow, Nedra Publ. 334 (in Russian).
3. All-Union Research Institute of Water Supply, Sewerage, Hydraulic Constructions and Engineering Hydrogeology ("VODGEO" AURI) of the USSR State Construction Committee (1989) *A Guide for the Design of Constructions for Groundwater Intake (to SNiP 2.04.02–84)*. Moscow, Stroiizdat Publ. 272 (in Russian).
4. Plotnikov N. A., Alekseev V. S. (1990) *Design and Operation of Groundwater Intakes*. Moscow, Stroiizdat Publ. 256 (in Russian).
5. Starinsky V. P., Mikhailik L. G. (1989) *Water Intake and Treatment Facilities of Municipal Water Supply Systems*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 269 (in Russian).
6. Gurinovich A. D. (2001) *Drinking Water Supply from Underground Sources: Problems and Solutions*. Minsk, Technoprint Publ. 305 (in Russian).
7. ТКР 45-4.01-199–2010 *Borehole Water Intakes. Design Rules* (in Russian).
8. Gavrilko V. M., Bessonov N. D. (1966) Operational Experience of Wells Equipped with Porous Ceramic Filters. *Trudy VNIIVodGeo [Transactions of All-Union Research Institute of Water Supply, Sewerage, Hydraulic Constructions and Engineering Hydrogeology of the USSR State Construction Committee]*, (13), 8–10 (in Russian).
9. Dubrovskii V. V., Kerchenskii M. M., Plokhov V. I. (1972) *Drilling and Equipment for Water Wells Guide*. Moscow, Nedra Publ. 512 (in Russian).
10. Zdor G. N., Sinitsyn A. V., Avrutin O. A. (2017) Pump Group Automatic Control for Reducing its Energy Consumption. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 54–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-54-66> (in Russian).
11. Ivashechkin V. V., Kondratovich A. N., Dobriyan G. K. (2005) Forecast of the Period of Stable Operation of Borehole Water Intakes Based on the Survey Results. *Chrezvychainye Situatsii: Preduprezhdenie i Likvidatsiya [Emergencies: Prevention and Response]*, 17 (7), 199–209 (in Russian).
12. Ivashechkin V. V., Sheiko A. M. (2006) Towards the Calculation of the Overhaul Periods of Borehole Water Intakes in View of Wells Deterioration. *Vestnik BNTU = Messenger of BNTU*, (5), 5–10. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-0-5-5-10> (in Russian).
13. Ivashechkin V. V., Sheiko A. M., Mikhnevich E. I. (2012) Forecast for a Decrease in the Specific Flow Rate of Wells in the Process of Operation. *Melioratsiya [Land Reclamation]*, (2), 33–43 (in Russian).
14. Ivanova I. E., Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V. (2018) Theoretical Studies of the Leaching Process of the Mudding Element in the Gravel Package of the Well Filter Using the Unit for Reverse-Reagent Regeneration. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 81–92. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-80-92> (in Russian).
15. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016) *Tables for the Hydraulic Calculation of Water Pipes*. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).