

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>
УДК 628.112

Моделирование работы скважинного водозабора подземных вод с кольцевым сборным водоводом

В. В. Веремениук¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, В. И. Крицкая¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Выполнен сравнительный анализ основных схем сборных водоводов скважинных водозаборов – линейной и кольцевой, что необходимо при выборе варианта для проектирования группового скважинного водозабора с циркульным расположением скважин. Установлено, что некрупный водозабор с индивидуальными радиальными подключениями к сборному узлу может иметь преимущества по снижению энергозатрат на транспортировку воды по сравнению с водозабором с кольцевым сборным водоводом, однако это в любом случае должно быть обосновано технико-экономическим сравнением, базирующимся на гидравлическом расчете системы подачи воды. Получены уравнения для расчета подачи насосов скважин водозабора с линейными сборными водоводами, в которых однозначно известно направление движения потоков воды. В кольцевом же сборном водоводе всегда существует точка разделения двух потоков, направленных по кольцу к сборному узлу по часовой стрелке и против нее. Причем положение этой точки зависит от количества включенных в работу скважин водозабора и параметров труб, соединяющих участки водовода. Отсутствие алгоритмов расчета кольцевого сборного водовода с не фиксированными по величине расходами в точках подключения скважин осложняет гидравлический расчет, а значит, и нахождение оптимального варианта водозабора. В статье представлен алгоритм гидравлического расчета водозабора с однокольцевым сборным водоводом, базирующийся на уравнении равенства потерь напора при движении воды от точки разделения двух потоков до сборного узла по различным путям движения и уравнении неразрывности. Полученный алгоритм легко распространяется на любое количество скважин. Рассмотрен численный пример гидравлического расчета группового водозабора, состоящего из восьми скважин, подключенных к кольцевому сборному водоводу.

Ключевые слова: водозабор подземных вод, водоснабжение, кольцевой сборный водовод, алгоритм расчета, удельный дебит скважин

Для цитирования: Веремениук, В. В. Моделирование работы скважинного водозабора подземных вод с кольцевым сборным водоводом / В. В. Веремениук, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 3. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>

Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit

V. V. Veremeniuk¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, V. I. Krytskaya¹⁾

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

Abstract. Among the considered options for schemes of prefabricated water conduits of borehole water intakes, the main ones are linear and ring schemes. The article presents a comparative

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
ivashechkin_vlad@mail.ru

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
ivashechkin_vlad@mail.ru

analysis of the linear and ring schemes for the placement of prefabricated water conduits when choosing an option for designing a group well water intake with a circular arrangement of wells. It is found that a small water intake with individual radial connections to the prefabricated unit can have advantages in reducing energy consumption for water transportation as compared to a water intake with an annular prefabricated conduit, which in any case should be justified by a feasibility comparison of options, which is based on hydraulic calculation water supply systems. Equations have been obtained for calculating the pumping rates of water intake wells with linear prefabricated conduits. It is shown that in an annular prefabricated conduit, in contrast to a linear one, in which the direction of movement of water flows is unambiguously known, there is always a point of separation of two flows directed along the ring to the prefabricated unit clockwise and counterclockwise, which makes it difficult to calculate such water intakes. Moreover, the position of this point depends on the number of water intake wells involved in the work and the parameters of the pipes connecting the sections of the water conduit. The absence of algorithms for calculating the ring prefabricated conduit with non-fixed flow rates at the well connection points complicates the hydraulic calculation, and, hence, finding the optimal water intake option. The article presents an algorithm for the hydraulic calculation of a water intake with a single-ring prefabricated conduit, which is based on the equation for the equality of pressure losses when water moves from the point of separation of two flows to the prefabricated unit along various paths and the continuity equation. The resulting algorithm can be easily extended to any number of wells. A numerical example of the hydraulic calculation of a group water intake, consisting of eight wells connected to an annular prefabricated, is considered.

Keywords: groundwater intake, water supply, annular prefabricated conduit, calculation algorithm, specific flow rate of wells

For citation: Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2023) Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (3), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300> (in Russian)

Введение

Для хозяйственно-питьевого водоснабжения средних и крупных населенных пунктов широко используют групповые скважинные водозаборы подземных вод, так как буровые скважины могут применяться при любой необходимой глубине, обладают высокой производительностью и наиболее полно соответствуют санитарным требованиям. Для этого группу скважин определенным образом размещают по площади выбранного участка, на котором залегают подземные воды водоносного горизонта с достаточными эксплуатационными запасами, и объединяют между собой сборными водоводами. Совокупность скважин водозабора представляет собой гидродинамически взаимосвязанную систему, включающую параметры пластов и водоводов. Поэтому наилучший вариант определяют исходя из гидравлических расчетов при условии учета гидродинамических закономерностей притока воды к скважинам и гидравлических параметров системы транспортировки воды. В качестве оптимального принимают водозабор, который не только обеспечивает подачу воды потребителю в заданном количестве и с требуемым напором, но и наименее затратен при строительстве и эксплуатации [1–4]. Обоснование типа и схемы размещения водозборных сооружений ведется по методу вариантного проектирования с технико-экономической оценкой каждого из конкурирующих вариантов. Экономическую эффективность устанавливают по минимуму приведенных

затрат, которые представляют собой сумму текущих издержек (эксплуатационных расходов) и единовременных затрат (капитальных вложений). Известно, что большую часть капитальных затрат составляет стоимость строительства скважин и водоводов, а порядка 75 % эксплуатационных расходов приходится на стоимость электроэнергии, потребляемой группой скважинных насосов. К проектированию в результате технико-экономических расчетов принимают наименее затратный вариант. Однако прежде всего необходимо произвести гидравлический расчет водозаборов по каждому из вариантов с нахождением подачи насосов при заданных длине и диаметре водоводов с учетом напорных характеристик насосов и скважин.

Иногда лучший вариант можно выбрать только на основе оценки гидравлических потерь в трубопроводах при транспортировке воды. В [5–6] показано, что типовые водозаборы с линейными сборными водоводами, куда поступает вода от всех скважин и далее транспортируется в сборный узел (СУ), в ряде случаев имеют большие эксплуатационные затраты, чем водозаборы без сборных водоводов, в которых скважины напрямую по своим напорным водоводам подают воду в СУ.

Водозаборы с кольцевым соединением сборных водоводов [1–3] в основном применяются при кольцевых и площадных схемах соединения водозаборных сооружений. Типовые схемы таких водозаборов [1, с. 218] представлены на рис. 1.

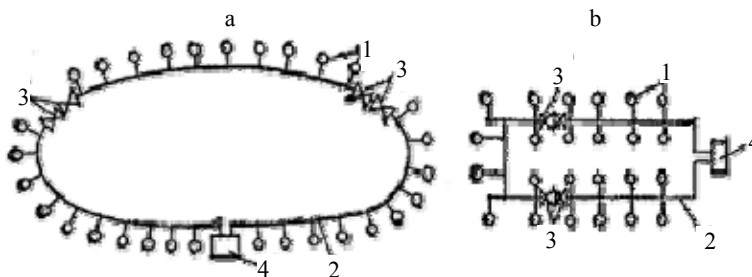


Рис. 1. Схемы водозаборов подземных вод с кольцевым соединением сборных водоводов при расположении скважин: а – кольцевом; б – площадном; 1 – скважина; 2 – сборный водовод; 3 – задвижка; 4 – сборный узел

Fig. 1. Schemes of groundwater intakes with an annular connection of prefabricated water conduits: a – with an annular arrangement of wells; b – with areal location of wells; 1 – wells; 2 – prefabricated conduits; 3 – valves; 4 – prefabricated unit

С точки зрения математического моделирования режимов работы таких простых кольцевых водозаборов (ПКВ), подходы к описанию схем, представленных на рис. 1, будут одинаковыми. Из схем исключаем задвижки, так как при их наличии водозаборы превращаются в линейные, процесс моделирования которых хорошо изучен [3–7]. Гидравлический расчет водозаборов с линейными сборными водоводами не представляет серьезных трудностей, так как здесь однозначно определено направление движения потоков воды. В то время как в кольцевом сборном водоводе всегда существует точка разделения двух потоков, направленных по кольцу к СУ по

часовой стрелке и против нее, причем положение этой точки не известно, зависит от количества включенных в работу скважин и других параметров. Отсутствие алгоритмов расчета кольцевого сборного водовода с не фиксированными по величине расходами в точках подключения скважин затрудняет гидравлический расчет, а значит, и нахождение оптимального варианта водозабора.

Цель настоящего исследования – разработка алгоритма и методики расчета водозабора с однокольцевым сборным водоводом.

Основная часть

Для моделирования используются исходные данные двух типов: гидрогеологические и конструктивные (параметры сборных трубопроводов водозабора, соединительных труб, скважин и насосов) [1–4]. На данные первого типа проектировщик повлиять, как правило, не может, а используя алгоритмы моделирования и варьируя в разумных пределах данные второго типа, он способен решать различные оптимизационные задачи.

Рассмотрим не крупный групповой водозабор, состоящий из шести концентрично расположенных водозаборных скважин (рис. 2).

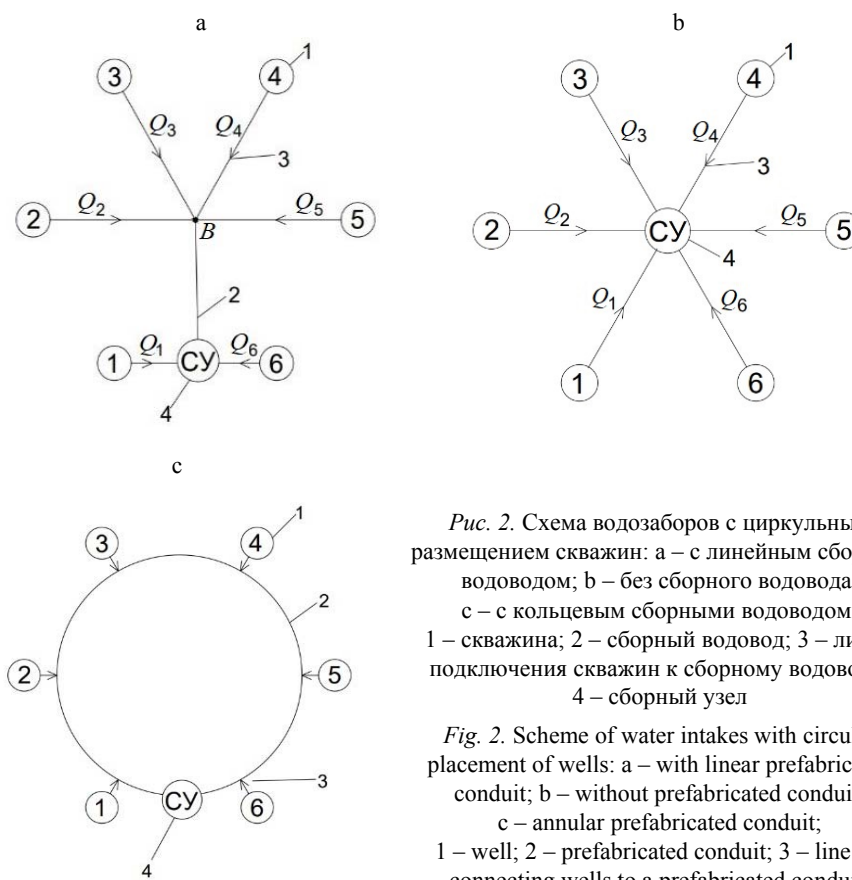


Рис. 2. Схема водозаборов с циркульным размещением скважин: а – с линейным сборным водоводом; б – без сборного водовода; с – с кольцевым сборными водоводом; 1 – скважина; 2 – сборный водовод; 3 – линия подключения скважин к сборному водоводу; 4 – сборный узел

Fig. 2. Scheme of water intakes with circular placement of wells: a – with linear prefabricated conduit; b – without prefabricated conduit; c – annular prefabricated conduit; 1 – well; 2 – prefabricated conduit; 3 – line for connecting wells to a prefabricated conduit; 4 – prefabricated unit

Представлены три варианта водозаборов: два линейных, в которых СУ располагаются на периферии (рис. 2а) и в центре (рис. 2б), и один кольцевой (рис. 2с). Все водозаборы имеют одинаковое количество концентрично расположенных скважин, пробуренных в тех же точках местности. На рис. 2а часть скважин соединена с помощью индивидуальных радиальных линий с центром водозабора (точка В), откуда начинается сборный водовод, а другая часть подключена непосредственно к СУ. На рис. 2б сборный водовод отсутствует, и каждая скважина напрямую соединена с СУ.

Рассмотрим алгоритм расчета линейного водозабора (рис. 2а). В самом общем случае при различных отметках статических уровней и удельных дебитах скважин, параметрах погружных насосов, геометрических размерах и сопротивлениях трубопроводов подачи насосов не будут одинаковыми. Для их определения можно записать систему из трех уравнений, первые два относятся к скважинам № 1 и 6, третье касается группы скважин № 2–5. В левой части записано выражение для напора H_n погружного насоса, в правой – сумма геометрического H_r , статического $H_{ст}$ напоров, понижения в скважине, а также потерь напора в трубопроводах, соединяющих соответствующую скважину с СУ:

$$\begin{cases} -a_1 Q_1^2 + b_1 Q_1 + c_1 = H_{r1} + H_{ст1} + \frac{Q_1}{q_1 \eta_1} + A_{в1} l_{в1} Q_1^2 + A_{лп1} l_{лп1} Q_1^2 ; \\ -a_6 Q_6^2 + b_6 Q_6 + c_6 = H_{r6} + H_{ст6} + \frac{Q_6}{q_6 \eta_6} + A_{в6} l_{в6} Q_6^2 + A_{лп6} l_{лп6} Q_6^2 ; \\ -a_i Q_i^2 + b_i Q_i + c_i = H_{ri} + H_{сти} + \frac{Q_i}{q_i \eta_i} + A_{ви} l_{ви} Q_i^2 + A_{лпи} l_{лпи} Q_i^2 + A_{св} l_{св} \left(\sum_{i=2}^5 Q_i \right)^2, \end{cases} \quad (1)$$

где a – некоторый фиктивный напор насоса; b, c – коэффициенты напорной характеристики насоса, характеризующие его фиктивное гидравлическое сопротивление; Q – подача насоса; q – удельный дебит скважины при ее одиночной работе; η – коэффициент, учитывающий снижение удельного дебита скважины из-за влияния взаимодействующих с ней скважин; $A_{в}, l_{в}, A_{лп}, l_{лп}, A_{св}, l_{св}$ – удельное сопротивление и длина водоподъемных труб, линий подключения скважин к сборному водоводу, сборного водовода соответственно.

Перейдем от общего случая к частному. Если параметры скважин № 2–5, трубопроводов от скважин до сборного водовода одинаковы, то подачи насосов данной группы скважин, подключенные к сборному водоводу в точке В, равны между собой. Аналогично подачи насосов группы скважин № 1, 6, напрямую подключенных к СУ, также равны между собой при одинаковых параметрах трубопроводов, скважин и насосов. Поддачи насосов группы скважин № 2–5 можно определить из квадратного уравнения

$$-a_i Q_i^2 + b_i Q_i + c_i = H_{гi} + H_{стi} + \frac{Q_i}{q_i \eta_i} + A_{вi} l_{вi} Q_i^2 + A_{лпi} l_{лпi} Q_i^2 + A_{св} l_{св} (m Q_i)^2, \quad (2)$$

где m – количество скважин, подключенных к точке B , $m = 4$.

Тогда

$$Q_i = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{q_i \eta_i} - b_i\right)^2 + 4(a_i + A_{вi} l_{вi} + A_{лпi} l_{лпi} + 16 A_{св} l_{св})(H_{гi} + H_{стi} - c_i)} - \left(\frac{1}{q_i \eta_i} - b_i\right)}{2(a_i + A_{вi} l_{вi} + A_{лпi} l_{лпi} + 16 A_{св} l_{св})}.$$

Поддачи насосов скважин № 1, 6 найдем аналогично (здесь $j = 1$ или 6):

$$-a_j Q_j^2 + b_j Q_j + c_j = H_{гj} + H_{стj} + \frac{Q_j}{q_j \eta_j} + A_{вj} l_{вj} Q_j^2 + A_{лпj} l_{лпj} Q_j^2. \quad (3)$$

Рассмотрим водозабор с циркульным размещением скважин и СУ в центре водозабора (рис. 2b). Так как сборный водовод здесь отсутствует и скважины напрямую соединены с СУ, расчет упрощается. При одинаковых параметрах всех скважин № 1–6 и трубопроводов, идущих от каждой из них к СУ, поддачи насосов найдем, используя уравнение вида (3).

Сравнительный анализ схем водозаборов при циркульном размещении скважин (рис. 2) показывает, что у водозабора с кольцевым сборным водоводом (рис. 2с) его протяженность составляет весь периметр кольца, что значительно больше, чем у водозабора с линейным сборным водоводом (рис. 2а), длина которого равна радиусу кольца. Потери напора в трубопроводе, как известно, пропорциональны его длине и квадрату расхода, поэтому чем длиннее сборный водовод, тем более значительное тормозящее влияние он будет оказывать на суммарную производительность всего водозабора при совместной работе скважин на СУ. Это чревато возрастанием эксплуатационных затрат на подъем воды из скважин и капитальных затрат на укладку труб больших диаметров. Поэтому в рассмотренных частных случаях циркульного размещения скважин (рис. 2) с высокой долей вероятности в качестве проектируемого варианта можно рекомендовать водозабор с кольцевой батареей скважин (рис. 2b), в которой сборный водовод вообще отсутствует. Однако для более общего случая, особенно при проектировании крупных водозаборов, всегда возникает необходимость в расчете кольцевого водозабора, принимаемого в качестве одного из конкурирующих вариантов (рис. 2с). Алгоритм расчета кольцевого водозабора представлен ниже.

Моделирование работы простых кольцевых водозаборов. Предлагаемый алгоритм расчета водозаборов с кольцевым соединением сборных водоводов является развитием методики расчета площадных водозаборов [8] и легко распространяется на любое количество скважин кольцевых водозаборов.

Рассмотрим алгоритм расчета ПКВ на примере водозабора, состоящего из СУ, 8 скважин, 14 водопроводных колодцев (узлов), соединенных кольцевым сборным водоводом (рис. 3).

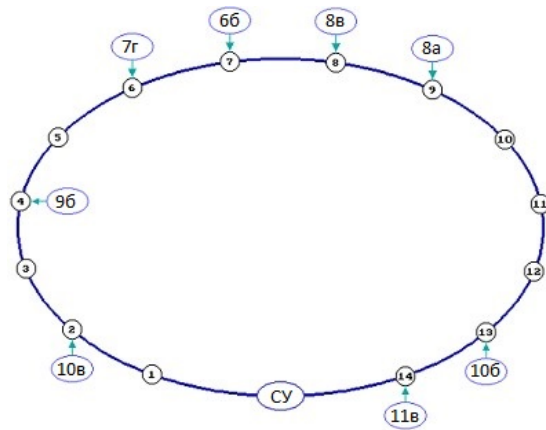


Рис. 3. Схема подключения скважин к кольцевому сборному водоводу
 Fig. 3. Scheme of connecting wells to the annular prefabricated conduit

Эллипсами с именами внутри помечены скважины, кружками с номерами – узлы на сборном водоводе, в которые приходят линии подключения скважин.

Ограничение количества скважин обусловлено только целью сократить выкладки и более предметно вести разговор, но никак не влияет на общность изложения.

При установившемся движении жидкость будет направляться к СУ по сборному водоводу с двух сторон (рис. 4). Следовательно, на данном ПКВ должен существовать узел разделения потоков (точка ветвления) с номером N , в районе которого течение воды будет происходить, как это показано на рис. 5. Такой узел на сборном водоводе только один, и к нему обязательно должна быть подключена хотя бы одна скважина, например с номером k и расходом Q_k (рис. 5).

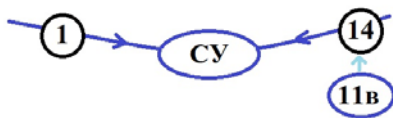


Рис. 4. Схема течения воды в районе сборного узла
 Fig. 4. Scheme of water flow in the vicinity of the prefabricated unit

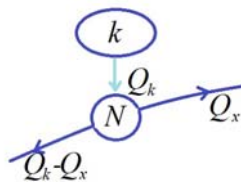


Рис. 5. Точка ветвления – узел N , к которому подключена скважина k с расходом Q_k
 Fig. 5. Branch point, i. e. unit number N , to which well number k is connected with a flow rate Q_k

Рассмотрим методику нахождения точки ветвления и расхода воды Q_x , вытекающей из нее по часовой стрелке.

Согласно общему алгоритму расчета работы водозаборов [8], необходимо найти распределение потоков воды между узлами (количество и направление) при заданных расходных характеристиках подключенных скважин, исходя из принципа равенства потерь напора при движении воды от заданного узла до СУ по различным путям движения. Это означает, что для узла N и некоторого значения $Q_x \in (0; Q_k)$ должно быть выполнено равенство

$$F_N^{\text{л}}(Q_x) = F_N^{\text{пр}}(Q_x), \quad (4)$$

где $F_N^{\text{л}}(Q_x)$, $F_N^{\text{пр}}(Q_x)$ – значение потерь напора при движении воды от узла N до СУ по левой (против часовой стрелки) или правой (по часовой стрелке) половине кольца соответственно.

Введем обозначения: Q_m – расход скважины с номером m (считаем, что они пронумерованы от 1 до 8 против часовой стрелки от СУ); G_{ij} – коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) участков сборного водовода от узла, к которому подключена скважина с номером i , до узла, к которому подключена скважина с номером j .

Потери напора определяются равенствами:

$$F_N^{\text{л}}(Q_x) = G_{N N-1} (Q_N - Q_x)^2 + G_{N-1 N-2} (Q_{N-1} + Q_N - Q_x)^2 + \dots + G_{1 \text{СУ}} (Q_1 + \dots + Q_N - Q_x)^2; \quad (5)$$

$$F_N^{\text{пр}}(Q_x) = G_{N N+1} Q_x^2 + G_{N+1 N+2} (Q_{N+1} + Q_x)^2 + \dots + G_{8 \text{СУ}} (Q_{N+1} + \dots + Q_8 + Q_x)^2, \quad (6)$$

где $G_{1 \text{СУ}}$ – КГС участка между узлом подключения скважины 1 до СУ; $G_{8 \text{СУ}}$ – КГС участка между узлом подключения скважины 8 до СУ.

Коэффициенты гидравлического сопротивления рассчитывают с использованием таблиц [9] по значениям диаметров труб, их материала и длины, а также скорости протекания воды по данному участку.

Решим уравнение (4) на интервале $(0; Q_k)$. Используя производную и представления (5) и (6), легко убедиться, что функция $F_N^{\text{л}}(Q_x)$ монотонно убывает по переменной Q_x на этом интервале, а функция $F_N^{\text{пр}}(Q_x)$ – монотонно возрастает (хотя технически это понятно и без производной). Данный факт дает возможность сделать два вывода:

1) если уравнение (4) имеет решение на интервале $(0; Q_k)$, то оно единственное;

2) необходимым и достаточным условием существования нужного нам решения является требование одновременного выполнения неравенств

$$\begin{cases} F_N^n(0) > F_N^{np}(0); \\ F_N^n(Q_k) < F_N^{np}(Q_k). \end{cases} \quad (7)$$

Сформулируем алгоритм моделирования работы ПКВ на основе изложенного в [8, с. 10]. Итак, если имеются некоторые приближенные значения расходов скважин $Q_1^{(i)}, \dots, Q_8^{(i)}$, то для каждого узла, к которому подключена скважина, по формулам (5) и (6) составляем функции $F_N^n(Q_x)$ и $F_N^{np}(Q_x)$ и проверяем выполнение условия (7). Как отмечалось выше, найдется только один узел, в котором будет выполнено (7). Это и есть точка ветвления для данного ПКВ и имеющихся расходов. После этого решаем уравнение (4) и находим расход Q_x справа от точки ветвления. Это можно сделать или численными методами, или преобразовав уравнение (4) к стандартному виду квадратного уравнения относительно Q_x (такое действие – весьма трудоемкий процесс). Затем находим расходы на каждом участке между узлами ПКВ согласно закону Кирхгофа [8, система (21)]. Возможно, эту процедуру определения точки ветвления и нахождения расхода Q_x придется повторить несколько раз, так как новые значения расходов на участках водовода могут привести к изменению значений КГС на этих участках. Как показала практика расчетов, обычно требуется 5–6 итераций. Далее необходимо выполнить второй шаг алгоритма из [8]. Рассмотрим пример расчета.

Пример. Расчетная схема представлена на рис. 3. Исходные данные по скважинам и водоводу (табл. 1–3) взяты из реального объекта – участка группового водозабора «Петровщина» г. Минска.

Таблица 1

Параметры скважин и насосного оборудования
Parameters of wells and pumping equipment

Наименование скважины	Удельный дебит q , м ² /ч	Статический напор $H_{ст}$, м	Отметка устья скважины, м	Коэффициент характеристики насоса $H^n = f(Q)$		
				$-a$, ч ² /м ⁵	b , ч /м ²	c , м
10в	2,18	6,40	211,15	0,0055	0,2513	68,817
9б	3,90	4,70	211,69	0,0036	0,1023	68,817
7г	11,90	9,76	218,43	0,0068	0,0739	57,488
6б	12,00	6,35	215,67	0,0040	0,0710	67,620
8в	1,64	4,50	211,87	0,0373	2,0381	58,135
8а	2,48	34,4	212,32	0,0188	0,2785	127,46
10б	4,12	7,04	211,33	0,0540	0,2251	66,161
11в	10,70	6,41	210,67	0,0173	1,3564	67,900

Таблица 2

Параметры водоподъемных труб и линий подключения скважин
Parameters of water-lifting pipes and well connection lines

Наименование скважины	Параметры водоподъемных труб			Параметры линий подключения		
	Диаметр $D_{вп}$, мм	Длина $L_{вп}$, м	Материал	Диаметр $D_{лп}$, мм	Длина $L_{лп}$, м	Материал
10в	125	38,0	полиэтилен	100	12,0	чугун
9б	110	37,6	полиэтилен	160	40,5	полиэтилен
7г	125	38,0	полиэтилен	160	38,0	полиэтилен
6б	125	25,0	полиэтилен	150	8,0	чугун
8в	140	44,0	полиэтилен	150	19,0	чугун
8а	125	63,4	полиэтилен	150	13,0	чугун
10б	140	31,5	полиэтилен	150	28,6	чугун
11в	125	32,0	полиэтилен	110	44,0	полиэтилен

Таблица 3

Параметры участков сборного водовода
Parameters of sections of the prefabricated conduit

Номер участка	Отметка устья водопроводного колодца, м	Материал	Диаметр D , мм	Длина L , м
Су-1	221,15	чугун	500	88,77
1-2	214,46	чугун	400	44,2
2-3	211,32	чугун	400	238
3-4	210,00	чугун	350	41,3
4-5	210,00	чугун	350	371,7
5-6	213,45	полиэтилен	315	16,5
		полиэтилен	400	120,4
		чугун	350	167,4
6-7	216,07	полиэтилен	250	128,1
		чугун	250	173,0
		чугун	300	322,0
7-8	216,07	Чугун	300	312,3
		полиэтилен	315	191,4
		чугун	300	122,0
8-9	210,69	чугун	300	36,5
9-10	210,74	чугун	350	403,5
10-11	209,15	чугун	400	256,5
11-12	209,15	чугун	400	42
12-13	208,86	чугун	400	35,5
13-14	209,16	чугун	400	64,4
14-СУ	209,00	чугун	400	121

Ниже приведены результаты расчетов для ПКВ (рис. 6), указанного на рис. 3.

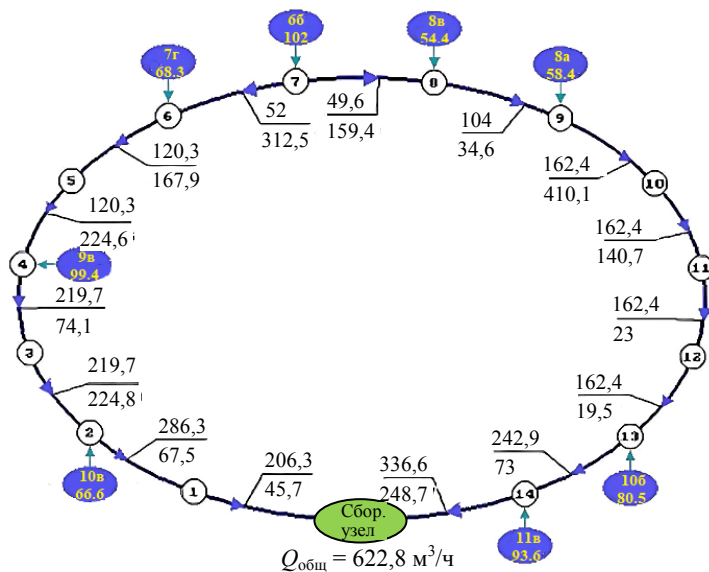


Рис. 6. Пример расчета реального простого кольцевого водозабора согласно указанному алгоритму

Fig. 6. An example of calculating the real simple annular water intake according to the specified algorithm

Синие эллипсы – подключенные скважины, внутри указаны их имена и рассчитанные расходы, $\text{м}^3/\text{ч}$. Вдоль участков между узлами в числителе указаны пропускаемые расходы, $\text{м}^3/\text{ч}$, в знаменателе – потери напора, мм. Отметим, что здесь точка ветвления – узел 7. Результат решения уравнения (4): $Q_x = 49,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен сравнительный анализ гидравлических схем водозаборов с циркульным расположением скважин при линейном и кольцевом соединениях сборных водоводов, а также схемы водозабора с индивидуальными радиальными линиями от скважин к сборному узлу. Получены уравнения для расчета подачи насосов водозаборов с индивидуальными радиальными линиями и линейным сборным водоводом.

2. Разработан алгоритм гидравлического расчета водозабора с однокольцевым сборным водоводом, который базируется на уравнении равенства потерь напора при движении воды от точки разделения двух потоков до сборного узла по различным путям движения и уравнении неразрывности. Полученный алгоритм может применяться при любом количестве скважин. Рассмотрен численный пример расчета группового водозабора, состоящего из восьми скважин, подключенных к кольцевому сборному водоводу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пособие по проектированию сооружений для забора подземных вод (к СНиП 2.04.02-84) / ВНИИВОДГЕО Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1989. 272 с.
2. Абрамов, С. К. Забор воды из подземного источника / С. К. Абрамов, В. С. Алексеев. М.: Колос, 1980. 269 с.

3. Старинский, В. П. Водозаборные и очистные сооружения коммунальных водопроводов / В. П. Старинский, Л. Г. Михайлик. Минск: Выш. шк., 1989. 269 с.
4. Ивашечкин, В. В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин: моногр. / В. В. Ивашечкин; под ред. А. Д. Гуриновича. Минск: БНТУ, 2005. 270 с.
5. Пурусова, И. Ю. Энергетически оптимальная работа водозаборных сооружений из подземных источников / И. Ю. Пурусова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45, № 4. С. 59–67. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-59-67>.
6. Щербак, В. И. Определение суммарной производительности водозаборных сооружений из подземных источников / В. И. Щербак, И. Ю. Пурусова // Технологии очистки воды «ТЕХНОВОД-2017»: материалы X юбилейной междунар. науч.-практ. конф., Астрахань, 5–6 октября 2017 г. Новочеркасск: Лик, 2017. С. 68–74.
7. Методика анализа фактического технического состояния скважинного насосного оборудования / В. В. Ивашечкин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021, Т. 64, № 3. С. 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286>.
8. Веремеиук, В. В. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Веремеиук, 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>.
9. Шевелев, Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. М.: Бастет, 2016. 428 с.

Поступила 27.04.2022 Подписана в печать 01.07.2022 Опубликовано онлайн 31.05.2023

REFERENCES

1. All-Union Research and Engineering Institute for Water Supply, Sewage Systems, Hydraulic Engineering Structures and Engineering Hydrogeology of the State Construction Committee of the USSR (1989) Manual on the Design of Structures for Groundwater Intake (to SNiP 2.04.02-84). Moscow, Stroiizdat Publ. 272 (in Russian).
2. Abramov S. K., Alekseev V. S. (1980) *Water Intake from an Underground Source*. Moscow, Kolos Publ. 269 (in Russian).
3. Starinskii V. P., Mikhailik L. G. (1989) *Water Intake and Treatment Facilities of Municipal Water Pipelines*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 269 (in Russian).
4. Ivashchkin V. V. (2005) *Gas-Pulse Technology for Restoring the Throughput Capacity of Filters of Water Intake Wells*. Minsk, BNTU. 270 (in Russian).
5. Purusova I. Yu. (2018) Energetically Optimal Work of Water Intake Structures from Underground Sources. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 45 (4), 59–67. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2018-45-4-59-67> (in Russian).
6. Shcherbakov V. I., Purusova I. Yu. Determination of the Total Productivity of Water Intake Structures from Underground Sources. *Tekhnologii Ochistki Vody «TEKHNOVOD-2017»: Materialy X Yubileinoi Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., Astrakhan', 5–6 Oktyabrya 2017 g.* [Technologies of Water Purification “TEKHNOVOD-2017”: Proceedings of the X Anniversary International Scientific and Practical Conference, Astrakhan, October 5–6, 2017]. Novocherchassk, Lik Publ., 68–74 (in Russian).
7. Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I., Anufriev V. N., Avrutin O. A. (2021) Methodology for Analyzing the Actual Technical Condition of Downhole Pumping Equipment *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (3), 275–286. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-275-286> (in Russian).
8. Veremenyuk V. V., Ivashchkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian).
9. Shevelev F. A., Shevelev A. F. (2016). *Tables for Hydraulic Calculation of Water Pipes*. Moscow, Bastet Publ. 428 (in Russian).

Received: 27 April 2022

Accepted: 1 July 2022

Published online: 31 May 2023