
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

HYDRAULIC STRUCTURES

Научная статья

УДК 626.01:628.11

Особенности гидравлических расчетов работы водозаборов с применением аналитических функций при строительстве гидротехнических сооружений

Мария Владимировна Кузнецова¹, Ольга Николаевна Маслак²

^{1, 2}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

¹Kuzmary@list.ru

²maslakon@rambler.ru

Аннотация. Целью работы являлся анализ исследований, посвященных применению гидродинамического метода расчета водозаборов, основанного на аналитическом решении краевых задач теории фильтрации подземных вод. Для сельскохозяйственного водоснабжения в основном используют подземные воды, которые имеют особое значение, так как до 85–95 % всей расходуемой воды потребители получают за их счет. При расчетах водозаборных сооружений необходимо учитывать загрязнение подземных вод промышленными стоками. Сложность проектирования водозаборных сооружений заключается в недостаточном использовании аналитических методов в гидравлических расчетах. **Материалы и методы.** В данной работе с использованием фильтрационной теоремы о прямой и обобщенной теоремы об окружности рассмотрен расчет работы водозабора при прямолинейной и круговой границах загрязнения подземных вод промышленными стоками. Также представлены исследования линейной двумерной фильтрации, которая описана с использованием комплексного потенциала аналитических функций. **Результаты.** Определено, что допустимый дебит скважины увеличивается при уменьшении коэффициента проводимости пласта загрязненной полуплоскости. Если загрязненная зона представляет собой грунт той же проводимости, что и незагрязненная, то допустимый дебит скважины вдвое больше по сравнению с допустимым дебитом скважины, работающей вблизи открытого бассейна с прямолинейной границей. Если область захвата скважины не пересекается с круглой зоной загрязнения, то это единственный критерий работы скважины без загрязнения, который не зависит от характера этой области. **Выводы.** Данные сведения позволяют более точно оценивать допустимый дебит скважины, влияющей на работу водозабора.

Ключевые слова: работа водозабора, дебит скважины, граница загрязнения, линейная фильтрация, комплексный потенциал, аналитические функции

Original article

Features of hydraulic calculations of water intakes using analytical functions in the hydraulic structures construction

Maria V. Kuznetsova¹, Olga N. Maslak²

^{1, 2}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹Kuzmary@list.ru

²maslakon@rambler.ru

Abstract. The purpose of the work was to analyze the studies devoted to the application of hydrodynamic method for calculating water intakes, based on the analytical solution of boundary value problems of the groundwater filtration theory. For agricultural water supply, groundwater is mainly used, which is of particular importance, since consumers receive up to 85–95 % of all water consumed at their expense. When calculating water intake facilities, it is necessary to take into account the pollution of groundwater by industrial effluents. The complexity of designing water intake structures lies in the insufficient use of analytical methods in hydraulic calculations. **Materials and methods.** In this paper, the calculation of water intake operation with rectilinear and circular boundaries of groundwater pollution by industrial effluents is considered, using the filtration theorem on the direct and the generalized theorem on a circle. The studies of linear two-dimensional filtration which is described using the complex potential of analytic functions are also presented. **Results.** It is determined that the allowable well yield increases by decreasing the conductivity coefficient of the formation of the contaminated half-plane. If the contaminated zone is soil of the same conductivity as the uncontaminated one, then the allowable well yield is twice as high as the allowable well yield operating near an open basin with a straight boundary. If the well capture area does not intersect with a circular contamination zone, then this is the only criterion for well operation without contamination, which does not depend on the nature of this area. **Conclusions.** This data will make it possible to assess more accurately the allowable well yield which affects the operation of the water intake.

Keywords: water intake operation, well yield, pollution boundary, linear filtration, complex potential, analytical functions

Введение. Сложность внедрения в практику проектирования водозаборных сооружений гидравлических расчетов, учитывающих загрязнение подземных вод промышленными стоками, связана с решением этих задач аналитическими методами. Эти методы основаны на знании математического анализа, теории функции комплексного переменного, а точнее комплексных потенциалов. При этом для морских побережий и солончаков необходимо также, чтобы не происходило засоления воды.

На работу водозабора влияет форма границ области загрязнения. Рассмотрим модели границ загрязнения или засоления, наиболее характерные и резко отличающиеся друг от друга (бесконечную прямую и окружность). В том случае, когда невозможно избежать загрязнения водозабора, для оценки рентабельности исследуют его относительную загрязненность [1].

Материалы и методы. В данной работе с использованием фильтрационной теоремы о прямой и обобщенной теоремы об окружности рассмотрен расчет работы водозабора при прямолинейной и круговой границах загрязнения подземных вод промышленными стоками. Также представлены исследования линейной двумерной фильтрации, которая описана с использованием комплексного потенциала аналитических функций.

Результаты и обсуждения.

1 Рассмотрим работу водозабора вблизи прямолинейной границы загрязнения [1].

Выберем ось Ox за прямую, которая является границей водозабора. Ось Oy проведем через центр скважины, расположенной в незагрязненной верхней полуплоскости в точке с координатами $x = 0, y = ai$. Пусть коэффициент проводимости незагрязненного пласта – k_1 , мСм/см, а загрязненной полуплоскости – k_2 , мСм/см. Пусть скважина питается естественным потоком подземных вод, который движется со скоростью V_0 , м/с, вдоль отрицательного направления оси Oy . Скважину будем моделировать стоком и определим такой ее дебит Q , м³/сут, в области с коэффициентом проводимости k_1 , чтобы загрязненные (или засоленные) воды нижней полуплоскости не попадали

в скважину. С использованием фильтрационной теоремы о прямой комплексные потенциалы рассматриваемого течения для зоны I с проводимостью k_1 и зоны II с проводимостью k_2 запишем следующим образом:

$$W_1 = V_0 z i - \frac{Q}{2\pi} \left[\ln(z - ai) + \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \ln(z + ai) \right], \quad (1)$$

$$W_2 = V_0 z i - \frac{Q}{2\pi} \frac{2k_2}{k_1 + k_2} \ln(z - ai),$$

где W_1, W_2 – комплексные потенциалы течения;

V_0 – скорость движения потока подземных вод, м/с;

Q – дебит скважины, м³/сут;

π – математическая постоянная, $\pi = 3,14$;

z – критическая точка течения;

a – расстояние от скважины до границы области загрязнения, м;

i – мнимая единица;

k_1 – коэффициент проводимости грунта незагрязненной области, мСм/см;

k_2 – коэффициент проводимости грунта загрязненной области, мСм/см.

Для того, чтобы в скважину не попадала жидкость, проходящая через зону II, необходимо, чтобы картина течения в крайнем случае имела вид, изображенный на рисунке 1, т. е. чтобы линии тока, проходящие через скважину, не располагались в зоне II [2].

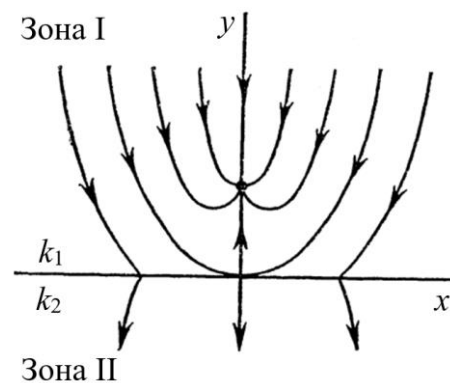


Рисунок 1 – Прямолинейная граница линии водозабора

Figure 1 – Rectilinear boundary of the water intake line

Располагаем критическую точку течения в начале координат. На основании равенства (1) найдем комплексную скорость течения в зоне I:

$$\frac{dW_1}{dz} = V_0 i - \frac{Q}{2\pi} \left[\frac{1}{z - ai} + \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \frac{1}{z + ai} \right]. \quad (2)$$

Если критическая точка течения находится в начале координат $z = 0$, то в силу равенства (2) справедливо уравнение:

$$V_0 i + \frac{Q}{2\pi} \left(\frac{1}{ai} - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \frac{1}{ai} \right) = 0.$$

Используем последнее уравнение при заданной скорости V_0 , м/с, не возмущенного скважиной потока грунтовых вод для определения дебита скважины Q , м³/сут, в которую не поступают загрязненные воды:

$$Q = \pi a V_0 \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \right). \quad (3)$$

Предельные случаи формулы (3) рассмотрим далее. Пусть незагрязненная и загрязненная области грунта обладают одинаковой проводимостью ($k_1 = k_2$) [3]. Дебит скважины, работающей без загрязнения, определим по формуле:

$$Q = 2\pi a V_0.$$

Пусть загрязненная область представляет собой свободную жидкость ($k_2 = \infty$). Тогда на основании формулы (3) дебит скважины:

$$Q = \pi a V_0.$$

Назовем дебит скважины при ее работе без загрязнения (или засоления) допустимым. Областью захвата называют область, занятую жидкостью, попадающей в скважину, а нейтральной линией – границу, проходящую через критическую точку.

Из двух последних формул очевидно, что если загрязненная область представляет собой грунт той же проводимости, что и незагрязненная область, то допустимый дебит скважины вдвое больше по сравнению с допустимым дебитом скважины, работающей «близки открытого бассейна с прямолинейной границей» (например, у берега моря).

Формула (3) показывает, что допустимый дебит скважины увеличивается при уменьшении k_2 . Однако предельный случай, когда $k_2 = 0$, не имеет места в рассматриваемой задаче [4]. В этом случае непроницаемой границей является ось Ox , что не соответствует предположению о загрязненном грунте зоны II и противоречит предположению о течении жидкости вдоль оси Oy , не возмущенном скважиной.

2 Исследуем работу водозабора вблизи круговой границы: определим комплексные потенциалы, комплексную скорость течения и дебит скважины, в которую не поступают загрязненные воды.

Пусть граница области загрязнения – окружность радиуса r_0 , м. Выберем в центре окружности начало координат. Пусть вне окружности незагрязненная зона имеет коэффициент проводимости k_1 , а коэффициент проводимости загрязненной зоны внутри окружности – k_2 . При этом скважина, моделируемая стоком, находится в поступательном потоке грунтовых вод, который движется со скоростью V_0 , м/с, и искажается зоной загрязнения.

Пусть ось Oy проходит через центр скважины, и положим, что поступательный поток имеет скорость V_0 , параллельную прямой, соединяющей скважину с центром загрязнения (рисунок 2) [5].

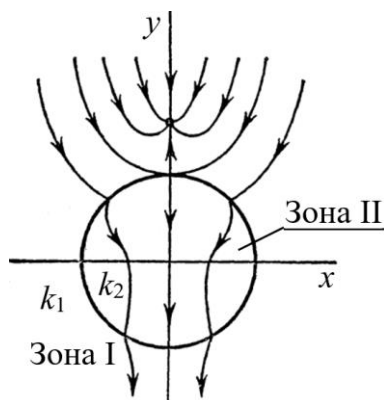


Рисунок 2 – Круговая граница линии водозабора
Figure 2 – Circular boundary of the water intake line

Обозначим через a , м, расстояние от скважины до границы зоны загрязнения. Тогда:

$$x = 0, y = r_0 + a,$$

где x , y – координаты центра скважины.

Используя обобщенную теорему об окружности, запишем комплексные потенциалы этого течения в виде:

$$W_1 = \frac{Q}{2\pi} \left[-\ln(z - (r_0 + a) \cdot i) - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \cdot \left[\ln\left(z - \frac{r_0^2}{r_0 + a} \cdot i\right) - \ln z \right] \right] + \\ + V_0 i \cdot \left[z + \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \cdot \left(\frac{r_0^2}{z} \right) \right], \\ W_2 = -\frac{Q}{2\pi} \cdot \frac{2k_2}{k_1 + k_2} \ln[z - (r_0 + a) \cdot i] + \frac{2k_2 V_0}{k_1 + k_2} z,$$

где r_0 – радиус границы зоны загрязнения, м.

Для того чтобы в скважину не попадала жидкость, проходящая через загрязненную зону, необходимо, чтобы область захвата скважины не пересекала загрязненную зону или в крайнем случае только касалась ее [6].

Последнее означает, что критическая точка течения должна иметь координаты $x = 0$, $y = r_0$ (рисунок 2). При этом комплексная скорость течения в незагрязненной зоне определяется по формуле:

$$\frac{dW_1}{dz} = \frac{Q}{2\pi} \left\{ -\frac{1}{z - (r_0 + a)i} - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \cdot \left[\frac{1}{z - \frac{r_0^2 i}{r_0 + a}} - \frac{1}{z} \right] \right\} + V_0 i \cdot \left(1 - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \cdot \frac{r_0^2}{z^2} \right),$$

где $\frac{dW_1}{dz}$ – комплексная скорость течения в зоне I, м/сут.

Тогда координаты указанной критической точки удовлетворяют уравнению:

$$\frac{Q}{2\pi} \left[\frac{1}{ai} - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \cdot \left(\frac{r_0 + a}{r_0 ai} - \frac{a}{r_0 ai} \right) \right] + V_0 i \cdot \left(1 - \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right) = 0.$$

Следующее уравнение служит для определения допустимого дебита скважины, работающей без загрязнения:

$$Q = 2\pi a V_0.$$

При этом в последнюю формулу не входят характеристики грунта загрязненной зоны. Можно сделать вывод, что условие непересечения области захвата скважины с круглой областью загрязнения – единственный критерий работы скважины без загрязнения, который не зависит от характера этой области. Частный случай – область загрязнения может быть квадратной, заполненной жидкостью.

Теперь предположим, что в однородном слое постоянной толщины имеет место линейная двумерная фильтрация, которую можно описать комплексным потенциалом W . Рассмотрим какую-либо кривую L , соединяющую любые точки, например A и C , основной плоскости течения, и вычислим расход жидкости ΔQ , м³/с, через слой, опирающийся на эту кривую [7]. Обозначая через V_n нормальную составляющую скорости вдоль L , запишем:

$$\Delta Q = \int_A^C V_n ds = \int_A^C \frac{\partial \psi}{\partial s} ds = \psi_C - \psi_A,$$

где ΔQ – расход жидкости, м³/с;

V_n – нормальная составляющая скорости;

ψ_C – значение функции тока в точке C;

ψ_A – значение функции тока в точке A.

Мы видим, что расход жидкости не зависит от формы кривой и определяется только значениями функции тока в ее крайних точках. Смоделируем работу водозабора стоком. Тогда расход жидкости определяется мощностью стока Q , Дж/с, или интегралом по замкнутому контуру, охватывающему точку расположения стока, вида:

$$\oint V_n ds = Q,$$

где Q – мощность стока, Дж/с.

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- допустимый дебит скважины увеличивается при уменьшении коэффициента проводимости пласта загрязненной полуплоскости;

- если загрязненная зона представляет собой грунт той же проводимости, что и незагрязненная, то допустимый дебит скважины вдвое больше по сравнению с допустимым дебитом скважины, работающей вблизи открытого бассейна с прямолинейной границей;

- если область захвата скважины не пересекается с круглой зоной загрязнения, то это единственный критерий работы скважины без загрязнения, который не зависит от характера этой области.

Данные сведения позволяют более точно оценивать допустимый дебит скважины, влияющей на работу водозабора.

Список источников

1. Лавров Н. П., Шипилов А. В. Методика проведения экспериментов на модели водозаборного сооружения для деривационной ГЭС // Сборник лучших докладов Неделю науки СПбГПУ. СПб., 2013. С. 15–17.

2. Малышева Н. Б., Розендорн Э. Р. Функции комплексного переменного: учебник. М.: Физматлит, 2010. 168 с.

3. Гаврилюк С. М., Бондаренко В. Л., Кувалкин А. В. Влияние тенденции посадки русла на надежность работы береговых водозаборных сооружений, находящихся в длительной эксплуатации // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2011. № 2(02). 15 с. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=443> (дата обращения: 01.03.2022).

4. Журба М. Г., Соколов Л. И., Говорова Ж. М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ, 2003. 288 с.

5. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Строительные нормы проектирования [Электронный ресурс]: ТКП 45-4.01-320-2018 (33020). URL: [https://schuchin-zhkh.by/assets/docs/%D0%A2%D0%9A%D0%9F%2045-4.01-320-2018%20\(33020\).pdf](https://schuchin-zhkh.by/assets/docs/%D0%A2%D0%9A%D0%9F%2045-4.01-320-2018%20(33020).pdf) (дата обращения: 10.02.2022).

6. Суреньянц С. Я., Иванов А. П. Эксплуатация водозаборов подземных вод. М.: Стройиздат, 1989. 80 с.

7. Плотников Н. А., Алексеев В. С. Проектирование и эксплуатация водозаборов подземных вод. М.: Стройиздат, 1990. 256 с.

References

1. Lavrov N.P., Shipilov A.V., 2013. *Metodika provedeniya eksperimentov na modeli vodozabornogo sooruzheniya dlya derivatsionnoy GES* [Methodology for conducting experiments on the model of a water intake structure for a diversion hydroelectric power station]. *Sbornik luchshikh dokladov Nedeli nauki SPbGPU* [Collection of the Best Reports of the SPbSPU Science Week]. St. Petersburg, pp. 15-17. (In Russian).
2. Malysheva N.B., Rozendorn E.R., 2010. *Funktsii kompleksnogo peremennogo: uchebnyk* [Functions of a Complex Variable: textbook]. Moscow, Fizmatlit Publ., 168 p. (In Russian).
3. Gavriilyuk S.M., Bondarenko V.L., Kuvalkin A.V., 2011. [Influence of tendency of canal landing on work reliability for coastal water intake structures being in long-term operation]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 2(02), 15 p., available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=443> [accessed 01.03.2022]. (In Russian).
4. Zhurba M.G., Sokolov L.I., Govorova Zh.M., 2003. *Vodosnabzhenie. Proektirovanie sistem i sooruzheniy: uchebnoe posobie* [Water Supply. Design of Systems and Structures: textbook]. 2nd ed., rev. Moscow, ASV Publ., 288 p. (In Russian).
5. *TKP 45-4.01-320-2018 (33020). Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Stroitel'nye normy proektirovaniya* [Water Supply. External Networks and Structures. Building Design Standards], available: [https://schuchin-zhkh.by/assets/docs/%D0%A2%D0%9A%D0%9F%2045-4.01-320-2018%20\(33020\).pdf](https://schuchin-zhkh.by/assets/docs/%D0%A2%D0%9A%D0%9F%2045-4.01-320-2018%20(33020).pdf) [accessed 10.02.2022]. (In Russian).
6. Surenyants S.Ya., Ivanov A.P., 1989. *Ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod* [Exploitation of Underground Water Intakes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 80 p. (In Russian).
7. Plotnikov N.A., Alekseev V.S., 1990. *Proyektirovanie i ekspluatatsiya vodozaborov podzemnykh vod* [Design and Operation of Underground Water Intakes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 256 p. (In Russian).

Информация об авторах

М. В. Кузнецова – доцент, кандидат технических наук;

О. Н. Маслак – доцент, кандидат технических наук.

Information about the authors

M. V. Kuznetsova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences;

O. N. Maslak – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.02.2022; одобрена после рецензирования 23.03.2022; принята к публикации 28.03.2022.

The article was submitted 15.02.2022; approved after reviewing 23.03.2022; accepted for publication 28.03.2022.