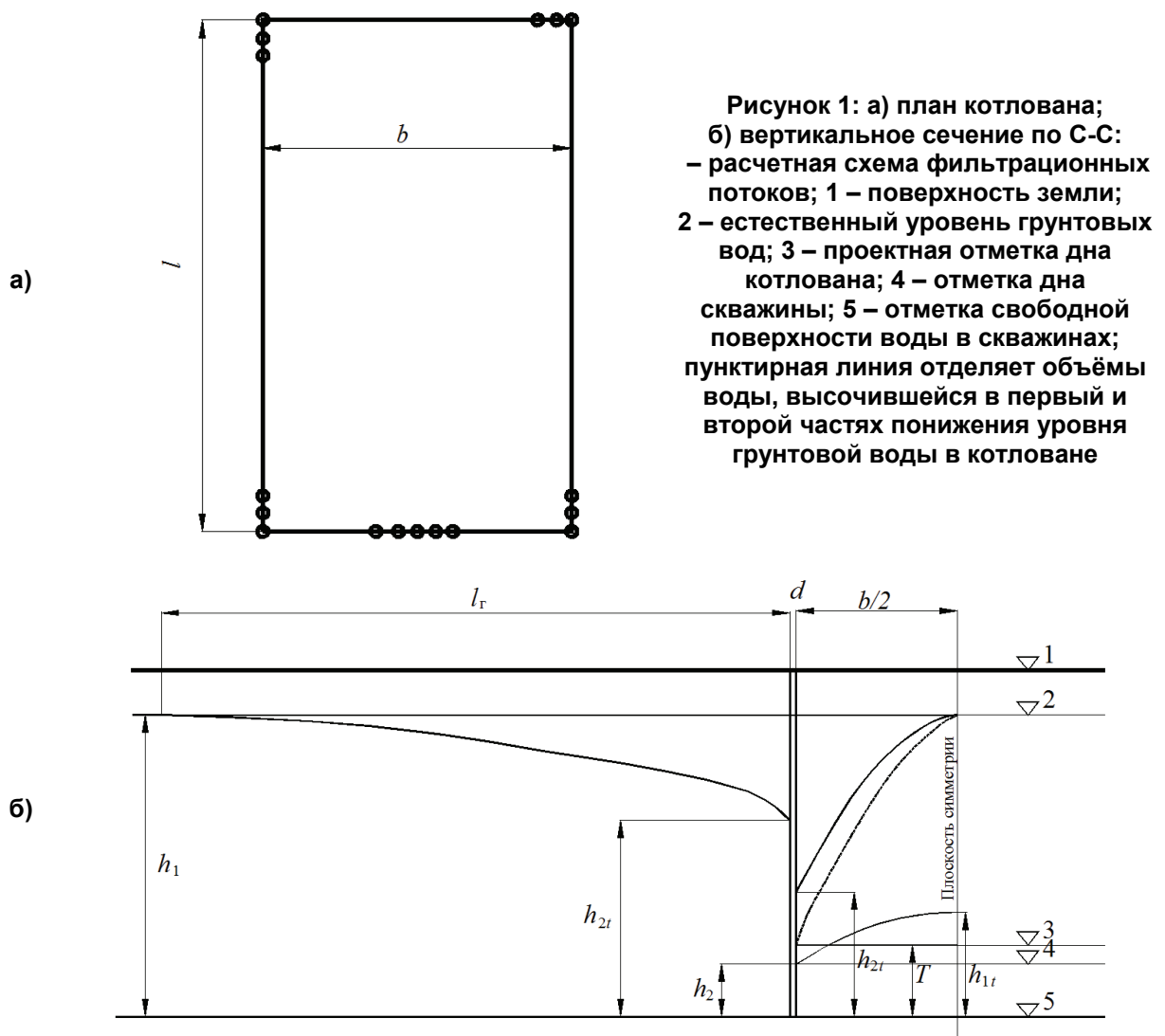


Время понижения уровня грунтовой воды при строительстве котлована

Д.т.н., профессор А.Д. Гиргидов,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Ключевые слова: грунтовая вода; водопонижение; котлован; скважина; время осушения строительной площадки; плавно изменяющийся фильтрационный поток; уравнение Дюпюи

При строительстве котлованов, дно которых расположено ниже естественного уровня свободной поверхности грунтовой воды, необходимо предварительно понизить этот уровень так, чтобы дно котлована было сухим, а на стенах котлована исключалось высачивание грунтовой воды. Наиболее простая технологическая схема водопонижения заключается в устройстве по периметру котлована ряда скважин, из которых откачивается вода (рис.1).



Уровень свободной поверхности воды во всех скважинах поддерживается постоянным ниже проектной отметки дна котлована ($h_2 < T$); скважины расположены настолько близко друг к другу, что их совокупность при отведении воды равносильна [1,2] вертикальной щели малой толщины d , проходящей по периметру котлована. Для больших плановых размеров котлована по сравнению с его глубиной и для длины l котлована, значительно большей его ширины b , при оценке времени водопонижения допустимо использовать решение задачи о плавноизменяющейся фильтрации [3,4] в плоскости, перпендикулярной длинной стороне котлована.

Введем следующие допущения.

1. Грунт внутри и вне котлована однородный с коэффициентом фильтрации k .
2. Притоком воды через дно щели пренебрегаем, и плоскость сравнения $0-0$ на уровне дна щели рассматриваем как водоупор [5-7].
3. После окончания водопонижения промежуток высачивания в щели со стороны котлована пренебрежимо мал по сравнению с h_2 .
4. К фильтрационному потоку при решении нестационарной задачи возможно применить условие квазистационарности в том смысле, что кривая депрессии описывается интегралом уравнения Дюпюи [8,9], а на большом удалении от щели справедливо дифференциальное уравнение Дюпюи. Сходный с принятым в статье метод смены стационарных состояний был предложен в [10].

Рассмотрим вначале водопонижение вне котлована. Будем считать, что на расстоянии большем длины влияния галереи l_r (в рассматриваемой задаче роль галереи играет щель) уровень грунтовой воды остается постоянным ($h_1 = \text{const}$). Как показано в [11-15], удельный расход q , поступающий в щель, не зависит от высоты промежутка высачивания и равен

$$q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_r}. \quad (1)$$

В начальный момент времени при $t = 0$, когда из построенной щели вода откачана до уровня h_2 , а уровень грунтовой воды ещё не изменился, т.е. кривая депрессии горизонтальна, вода начинает высачиваться через вертикальную стенку щели. Фильтрационный расход q_1 , поступающий из области фильтрации, расположенной от щели далее чем l_r , равен нулю, так как на расстоянии l_r кривая депрессии при $t = 0$ горизонтальна:

$$q_1 = -kh_1 \left. \frac{dh}{dx} \right|_{x=0} = 0. \quad (2)$$

В результате высачивания объем грунтовой воды в расчетной области фильтрации уменьшается, уровень свободной поверхности понижается. Согласно допущению 4, через время t кривая депрессии будет описываться уравнением:

$$h(x,t) = \sqrt{h_{2t}^2 + \frac{h_1^2 - h_{2t}^2}{l_r} (l_r - x)}, \quad (3)$$

где $h(x,t)$ – отметка кривой депрессии в момент времени t в вертикальном сечении с координатой x ; $h_{2t} = h_{2t}(t)$ – отметка кривой депрессии на вертикальной стенке щели; $(h_{2t} - h_2)$ – высота промежутка высачивания при нестационарном режиме в момент t .

Объем воды V , который за время t выдавится из области фильтрации, равен:

$$V = \int_0^{l_r} [h_1 - h(x,t)] dx = \frac{2l_r}{3} \frac{h_1^2 + h_1 h_{2t} + h_{2t}^2}{h_1 + h_{2t}}. \quad (4)$$

Расход q_2 , поступающий в щель за счет понижения кривой депрессии, в момент времени t равен:

$$q_2 = \frac{dV}{dt} = -\frac{2l_r}{3} \frac{h_{2t} + 2h_1 h_{2t}}{(h_1 + h_{2t})^2} \frac{dh_{2t}}{dt}. \quad (5)$$

После понижения кривой свободной поверхности на интервале длины $(0, l_r)$, при $x = 0$ образуется положительный уклон кривой депрессии, благодаря которому при $t > 0$ вода начнет поступать в область фильтрации, а следовательно, и в щель, из областей, расположенных от щели далее, чем длина влияния l_r . Расход q_1 этой воды равен:

$$q_1 = -kh_1 \left. \frac{dh}{dx} \right|_{x=0} = k \frac{h_1^2 - h_{2t}^2}{2l_r}. \quad (6)$$

Как отмечено выше, сумма расходов $q_1 + q_2$ должна быть равна расходу q , который не зависит от высоты промежутка высачивания h_{2t} :

$$q_1 + q_2 = q. \quad (7)$$

Подставив в (7) выражения (1), (5) и (6), получим дифференциальное уравнение:

$$k \frac{h_1^2 - h_{2t}^2}{2l_r} - \frac{2l_r}{3} \frac{h_{2t}^2 + 2h_{2t}h_1}{(h_1 + h_{2t})^2} \frac{dh_{2t}}{dt} = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2l_r}. \quad (8)$$

Интегрируя это уравнение, вычислим необходимое время t_n , за которое кривая депрессии примет установившийся вид, а промежуток высачивания окажется ниже дна котлована:

$$t_n = - \int_{h_1}^T \frac{4l_r^2}{3k} \frac{(h_{2t}^2 + 2h_{2t}h_1)}{(h_1^2 - h_{2t}^2)(h_1 + h_{2t})^2} dh_{2t}. \quad (9)$$

Зависимость (9) допускает представление интеграла в виде формулы:

$$t_n = \frac{4l_r}{3k} \left[\frac{1}{2h_2} \ln \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \frac{T + h_2}{T - h_2} - A \ln \frac{h_1 + h_2}{T + h_2} + B \ln \frac{h_1 - h_2}{T - h_2} - \frac{C}{2h_1} + \frac{C}{T + h_1} + D \ln \frac{2h_1}{T + h_1} \right], \quad (10)$$

где $A = \frac{h_1(h_1 + T)^2}{4(h_1 - T)TE}$; $B = -\frac{h_1(h_1 - T)}{4TE}$; $C = -\frac{h_1(h_1 + T)}{2E}$; $D = -\frac{h_1^2}{(h_1 - T)E}$;

$$E = \frac{T^3}{2h_1} + \frac{T^2}{2} - \frac{Th_1}{2} - \frac{h_1^2}{2}.$$

Обратимся к вычислению времени, необходимого для понижения уровня свободной поверхности грунтовой воды внутри котлована шириной b . Этот процесс разделим на две части [16,17]:

1. Понижение уровня воды за счет высачивания через вертикальную грань щели при сохранении в середине котлована глубины h_1 . Эта задача решается при тех же допущениях, что и предыдущая задача, но здесь $q_1 = 0$, так как срединное сечение потока в котловане является плоскостью симметрии. Из (7) и (8) при $q_1 = 0$ и $l_r = \frac{b}{2}$ найдем время t_1 этой части процесса:

$$t_1 = - \int_{h_1}^T \frac{b^2}{3k} \frac{h_{2t}^2 + 2h_{2t}h_1}{(h_1^2 - h_{2t}^2)(h_1 + h_{2t})^2} dh_{2t} = \frac{b^2}{3k} \frac{h_1 + 2h_2}{(h_1 + h_2)^2}. \quad (11)$$

После завершения первой части водопонижения внутри котлована формируется кривая депрессии, представленная на рис. 1 пунктиром, и начинается вторая часть. Для упрощения считаем, что промежуток высачивания ($T = h_2$), который образовался в конце первой части, пренебрежимо мало влияет на водопонижение во второй части (в течение которой он уменьшается до нуля).

2. Понижение уровня воды при истечении в щель за счет понижения уровня воды в середине котлована. Объем воды в момент времени t (для одной из симметричных частей):

$$V(t) = \int_0^{\frac{b}{2}} h(x, t) dx = \int_0^{\frac{b}{2}} \sqrt{h_2^2 + \frac{h_{1t}^2 - h_2^2}{\frac{b}{2}} \left(\frac{b}{2} - x\right)} dx = \frac{b}{2} \frac{h_{1t}^2 + h_{1t}h_2 + h_2^2}{h_{1t} + h_2},$$

где $h_{1t} = h\left(\frac{b}{2}, t\right)$ – глубина фильтрационного потока в середине котлована.

Расход, обусловленный понижением кривой депрессии, найдем, дифференцируя по t объем:

$$q = \frac{dV}{dt} = -\frac{b}{3} \frac{h_{1t}^2 + 2h_{1t}h_2}{(h_{1t} + h_2)^2} h_{1t}^2. \quad (12)$$

Этот расход, используя допущение 4, приравняем к расходу, вычисленному по интегральной формуле Дюпюи; получим:

$$-\frac{b}{3} \frac{h_{1t}^2 + 2h_{1t}h_2}{(h_{1t} + h_2)^2} \frac{dh_{1t}}{dt} = k \frac{h_{1t}^2 - h_2^2}{b}. \quad (13)$$

Из (12) можно вычислить время t_2 второй части процесса понижения уровня:

$$t_2 = \int_{h_1}^T \frac{b^2}{3k} \frac{h_{1t}^2 + 2h_{1t}h_2}{(h_{1t} + h_2)^2 (h_{1t}^2 - h_2^2)} dh_{1t}. \quad (14)$$

Этот интеграл также можно представить в виде формулы:

$$t_2 = \frac{b^2}{3k} \left[\frac{1}{2h_1} \ln \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \frac{T + h_2}{T - h_2} + \frac{h_2}{4} \left(\frac{1}{(T + h_2)^2} - \frac{1}{(h_1 + h_2)^2} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{T + h_2} - \frac{1}{h_1 + h_2} \right) + \frac{1}{4h_2} \ln \frac{(T + h_2)}{(T - h_2)} \right]. \quad (15)$$

Разделение водопонижения внутри котлована на две части условно; оно вызвано необходимостью упрощения расчетной схемы и не всегда реализуется последовательно и независимо друг от друга. Можно представить, что понижение уровня свободной поверхности в середине котлована начнется прежде, чем высота промежутка высачивания h_{2t} станет меньше T . Учитывая это обстоятельство, следует считать, что суммарное время первой и второй частей процесса понижения уровня грунтовой воды внутри котлована несколько превышает реальное время процесса.

Отметим также, что полученные формулы справедливы для вычисления времени притока воды к длинной стороне котлована длиной $l \gg b$. С учетом притока к короткой стороне котлована длиной l и неплоских условий притока вблизи углов следует ожидать, что время водопонижения внутри строительной площадки будет меньше расчетного по формулам (11) и (15), и время водопонижения в области вне котлована будет больше расчетного по формуле (10).

Пример расчета

Котлован (см. рис. 1) шириной $b = 20$ м и глубиной 7 м должен быть построен в среднезернистом грунте с коэффициентом фильтрации $k = 10^{-4}$ м/с.

Уровень грунтовой воды в естественных условиях ниже поверхности земли на 1 м. Зададим глубину скважин по периметру котлована равной 9 м, а уровень воды в них в процессе откачки на 1,5 м выше дна скважины. Имеем:

$$h_1 = 8 \text{ м}; h_2 = 1,5 \text{ м}; T = 20 \text{ м}.$$

Длина влияния галереи [18] $l = 200$ м. По формуле (10) вычислим время понижения уровня воды вне котлована:

$$t_{\text{н}} = 1,88 \cdot 10^8 \text{ с} = 2170 \text{ суток}.$$

По формуле (11) найдем время первой части понижения уровня воды внутри периметра площадки котлована:

$$t_1 = 16,75 \cdot 10^4 = 1,88 \text{ суток.}$$

Время второй части понижения уровня внутри котлована:

$$t_2 = 6,58 \cdot 10^5 = 7,62 \text{ суток.}$$

Результаты расчетов показывают, что понижение уровня грунтовых вод следует начинать за 10 суток до начала строительства котлована. Водопонижение должно продолжаться весь период строительства; время понижения уровня воды вне котлована (более 6 лет) свидетельствует о том, что в процессе строительства высачивание воды, поступающей извне, по периметру котлована будет иметь место на значительной высоте, и, если скважины расположены недостаточно близко [1,2], то возможно попадание просачивающейся между ними воды на строительную площадку котлована.

Литература

1. Полубаринова-Кочина П. Я. О радиусе влияния скважины // Изв. СО АН СССР, Механика жидкости и газа. 1960. №5. С. 20-29.
2. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
3. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М.: Мир, 1971. 452 с.
4. Арье А. Г. Физические основы фильтрации подземных вод. М.: Недра, 1984. 101 с.
5. Толпаев В. А. Математическая модель для фильтрации расчета гидротехнических сооружений // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. СПб.: 2001. Т. 293. С. 98-109.
6. Maas C. Groundwater flow to a well in a layered porous medium // Water resources reseach. 1987. V. 23, No. 8. Pp. 1675-1681.
7. Petersen J. S., Rochwer C., Albertson M. L. Effect of well screen on flow into wells // Proc. ASCE. 1953. Vol. 79. Paper No. 365.
8. Бухарцев В. Н., Петриченко М. Р., Головкова Н. В. Средняя квадратичная аппроксимация кривой депрессии для случая плоской совершенной траншеи с вертикальными стенками // Инженерно-строительный журнал. 2009. №1. С. 22-25.
9. Прусов И. А. Двумерные краевые задачи фильтрации. Минск.: Изд. Университетское, 1987. 182 с.
10. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики. М.: Гостоптехиздат. 1956. 260 с.
11. Чарный И. А. Строгое доказательство формул Дюпюи для безнапорной фильтрации с промежутком высачивания // Докл. АН СССР. 1951. Т. 79, №6. С. 937-940.
12. Чарный И. А. О величине промежутка высачивания при безнапорной фильтрации // Докл. АН СССР, 1951. Т. 80, №1. С. 29-33.
13. Девисон Б. Б. Об установившемся движении грунтовых вод через земляные плотины // Уч. зап. Гос. гидрологического ин-та. 1932. №6. С. 11-19.
14. Hamel G. Ueber Grundwasserströmung // Z. angew. Math. and Mech. 1934. V. 14, No. 3. Pp. 129-157.
15. Бухарцев В. Н., Петриченко М. Р. Решение задачи о фильтрации в однородном грунте с применением вариационных методов // Гидротехническое строительство. 2012. № 3. С. 29-35.
16. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкости и газов в недеформируемой пористой среде. М.: Гостехиздат, 1953. 616 с.
17. Зайцев О. И., Орлов В. Т. Гидравлика: методическое указание по разделу «Фильтрация». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 48 с.
18. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.

**Артур Давидович Гиргидов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)297-84-15; эл. почта: ardgir@mail.ru

© Гиргидов А.Д., 2012

doi: 10.5862/MCE.30.8

The time of groundwater free surface lowering before foundation pit construction

A.D. Girgidov

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)297-84-15; e-mail: ardgir@mail.ru

Key words

groundwater; pit; free surface flow: lowering of free surface; group of wells; time of lowering

Abstract

On the basis of plane free surface gravitations groundwater flow model and some assumptions similar to ones employing in infiltration and quasistationary problems the time of the necessary lowering of free surface before the building of pit is considered. For the lowering the group of wells along the pit perimeter is used. The wells are located so close to each other that formation a filtration flow by them is equivalent to dewatering by using a narrow vertical slit along the perimeter of the excavation.

The time is calculated on the basis of condition that at the beginning of construction the level of ground water within the excavation must be below the design elevation of excavation bottom, and outside it smoothly changing water flow to the slit must be formed.

The formulas for the time of lowering from initial natural level before building of pit to finite level equal to the bottom of pit are obtained. The example of calculation is discussed.

References

1. Polubarinova-Kochina P. Ya. *Izv. SO ANSSSR, Mekhanika zhidkosti i gaza* [Proceedings of the SB ANSSSR, Fluid Mechanics]. 1960. No. 5. Pp. 20-29.
2. Polubarinova-Kochina P. Ya. *Teoriya dvizheniya gruntovykh vod* [Theory of groundwater movement]. Moscow: Nauka, 1977. 664 p.
3. Ber Ya., Zaslavski D., Irmey S. *Fiziko-matematicheskiye osnovy filtratsii vody* [Physical and mathematical foundations of water filtration]. Moscow: Mir, 1971. 452 p.
4. Arye A. G. *Fizicheskiye osnovy filtratsii podzemnykh vod* [Physical principles of groundwater filtration]. Moscow: Nedra, 1984. 101 p.
5. Tolpayev V. A. *Izv. VNIIG im. B.E. Vedeneyeva* [Proceedings of VNIIG named after B.E. Vedeneyev]. Saint-Petersburg: 2001. Vol. 293. Pp. 98-109.
6. Maas C. Groundwater flow to a well in a layered porous medium. *Water resources reseach*. 1987. V. 23, No. 8. Pp. 1675-1681.
7. Petersen J. S., Rochwer C., Albertson M. L. Effect of well screen on flow into wells. *Proc. ASCE*. 1953. Vol. 79. Paper No. 365.
8. Bukhartsev V. N., Petrichenko M. R., Golovkova N. V. *Magazine of civil engineering*. 2009. No.1. Pp. 22-25. (rus)
9. Prusov I. A. *Dvumernyye krayevyye zadachi filtratsii* [Two-dimensional boundary value problem of the filtration]. Minsk: Izd. Universitetskoye, 1987. 182 p. (rus)
10. Charnyy I. A. *Osnovy podzemnoy gidravliki* [Basics of underground hydraulics]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1956. 260 p. (rus)
11. Charnyy I. A. *Dokl. AN SSSR* [Proceedings of AN SSSR]. 1951. Vol. 79, No.6. Pp. 937-940. (rus)
12. Charnyy I. A. *Dokl. AN SSSR* [Proceedings of AN SSSR]. 1951. Vol. 80, No.1. Pp. 29-33. (rus)
13. Devison B. B. *Uch. zap. Gos. gidrologicheskogo in-ta* [Textbook of State hydrological institute]. 1932. No.6. Pp. 11-19. (rus)
14. Hamel G. Ueber Grundwasserströmung. *Z. angew. Math. and Mech*. 1934. V. 14, No. 3. Pp. 129-157.
15. Bukhartsev V. N., Petrichenko M. R. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo* [Hydraulic Engineering]. 2012. No. 3. Pp. 29-35. (rus)
16. Aravin V. I., Numerov S. N. *Teoriya dvizheniya zhidkosti i gazov v nedeformiruyemoy poristoy srede* [The theory of fluid and gas motion in non-deformable porous medium]. Moscow: Gostekhizdat, 1953. 616 p. (rus)
17. Zaytsev O. I., Orlov V. T. *Gidravlika: metodicheskoye ukazaniye po razdelu «Filtratsiya»* [Hydraulics: a guideline for the section "Filtering"]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. 48 p. (rus)
18. Girgidov A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 545 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 52-56.

Girgidov A.D. The time of groundwater free surface lowering before foundation pit construction