

## ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ ПРИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ТАГИЛЬЦЕВ С. Н., ТАГИЛЬЦЕВ В. С.

*При проведении гидрогеологических исследований на стадиях разведки и подготовки к эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых фильтрационные опробования имеют существенные отличия от опытно-фильтрационных работ, которые выполняются при разведке подземных вод. Основные особенности определяются отличительными чертами геологической среды вблизи земной поверхности и организационно-методическими традициями гидрогеологических исследований, такими как двухслойное строение пласта, низкие фильтрационные свойства горных пород, небольшие дебиты фильтрационных опробований, кратковременность откачек, влияние емкости ствола скважин на получаемые данные. Снижение погрешности и обеспечение необходимой точности определения гидродинамических параметров обеспечивается реализацией специального алгоритма действий при проведении и обработке данных откачек. Анализ гидрогеологической ситуации и профессиональный подход к проведению работ позволяют получить всю гидрогеодинамическую информацию, необходимую для обеспечения проектирования и эксплуатации горнодобывающих объектов.*

**Ключевые слова:** *фильтрационные опробования; месторождения твердых полезных ископаемых; двухслойное строение пласта; низкие фильтрационные свойства; влияние емкости ствола скважин.*

При проведении гидрогеологических исследований на стадиях разведки и подготовки к эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых опытно-фильтрационные работы имеют существенные отличия от фильтрационных опробований, которые выполняются при поисках и разведке подземных вод [1–4]. Эти отличия можно разделить на две условные группы. Первая группа объединяет особенности, которые определяются отличительными чертами геологической среды, в которой проводятся фильтрационные опробования [1, 2, 5]. Вторая группа отличий включает организационно-методические особенности гидрогеологических исследований на месторождениях твердых полезных ископаемых. Эти особенности определяются целями производимых работ и организационно-методическими традициями и привычками [4, 5].

Большинство гидрогеологических исследований выполняется вблизи дневной поверхности, в приповерхностной части геологического разреза. Приповерх-

---

**Тагильцев Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: tagiltsev@k66.ru

**Тагильцев Викентий Сергеевич** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: vikhgeo@gmail.com

ностная часть геологического разреза чаще всего имеет двухслойное строение. В интервале глубин от поверхности земли до 3–15 м, как правило, развиты покровные четвертичные образования различного генезиса. По литологическому составу эти отложения обычно существенно глинистые. Коренные породы, имеющие палеозойский или мезозойский возраст, залегают ниже покровных образований и значительно отличаются по литологическому составу и фильтрационным свойствам.

Если уровень подземных вод находится в покровных отложениях, то при гидродинамических исследованиях реализуется схема двухслойного пласта [4–6]. В большинстве случаев при проведении гидрогеологических работ двухслойный пласт имеет относительно низкие фильтрационные свойства. Коэффициент фильтрации коренных пород составляет меньше 1 м/сут, а параметр водопроницаемости – не более 10–20 м<sup>2</sup>/сут. В связи с относительно низкими фильтрационными свойствами водоносного горизонта при проведении опытных работ необходимо использовать небольшие дебиты скважин, которые требуют специального подбора насосного оборудования и диаметров скважин.

Низкие фильтрационные свойства определяют особые условия проведения откачек и наливов. Дебит откачки или налива должен обеспечивать оптимальное значение понижения (или повышения) уровня подземных вод. Нередко завышенный дебит вызывает осушение скважины и делает невозможным полноценное выполнение задач фильтрационных опробований.

При проведении исследований в породах со слабыми фильтрационными свойствами начальные периоды понижения и восстановления уровней всегда осложняются участием в формировании дебита откачки емкости (объема) опытной скважины. Если пласт обладает низкими фильтрационными свойствами, то часть дебита воды, откачиваемая из скважины, формируется за счет жидкости, которая находится в стволе скважины [4, 5, 7]. В этом случае развитие понижения уровня в пласте задерживается и график приобретает характерный вид (рис. 1).

Данные фильтрационных опробований обрабатываются с помощью графиков:  $\Delta H - \lg t$ ;  $S - \lg t$ ;  $S_b - \lg[(t_0 + t_b)/t_b]$ , где  $S$  – понижение уровня при откачке;  $\Delta H$  – восстановление уровня при откачке;  $S_b$  – понижение уровня на этапе восстановления;  $t$  – время от начала откачки;  $t_0$  – продолжительность откачки;  $t_b$  – время в процессе восстановления уровня.

Перечисленные зависимости и их графическое изображение обычно называют временными графиками. В качестве критерия, позволяющего оценивать продолжительность влияния емкости опытной скважины на форму графиков временного прослеживания, обычно используется выражение [4, 5, 7]:

$$(\omega_c S) / (Q t_{cm}) \leq \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  – площадь сечения ствола скважины;  $t_{cm}$  – продолжительность влияния емкости скважины;  $Q$  – дебит откачки (налива);  $\varepsilon$  – допустимая погрешность.

В типовых условиях гидрогеологических исследований последнее выражение упрощается до вида [5, 8]

$$t_{cm} = 0,1 / T, \quad (2)$$

где  $T$  – водопроницаемость пласта.

Влияние емкости скважин на форму временных графиков имеет значительную продолжительность при проведении опробований в пластах с относительно низкими фильтрационными свойствами. Например, если  $T = 5$  м<sup>2</sup>/сут, то продолжи-

тельность периода деформации временного графика составляет примерно 0,5 часа. Неправильный выбор представительного участка временного графика (на участке влияния емкости скважины) обычно приводит к занижению значения фильтрационных характеристик (параметра  $T$ ) в 3–5 раз [4, 7].

В тех случаях, когда представительный участок графика слабо выражен и рассчитать значение коэффициента  $C_p$  (уклон графика на участке, где отсутствует влияние емкости) с достаточной точностью не представляется возможным, можно определить значение  $C_y$ . Это условный коэффициент, который определяется

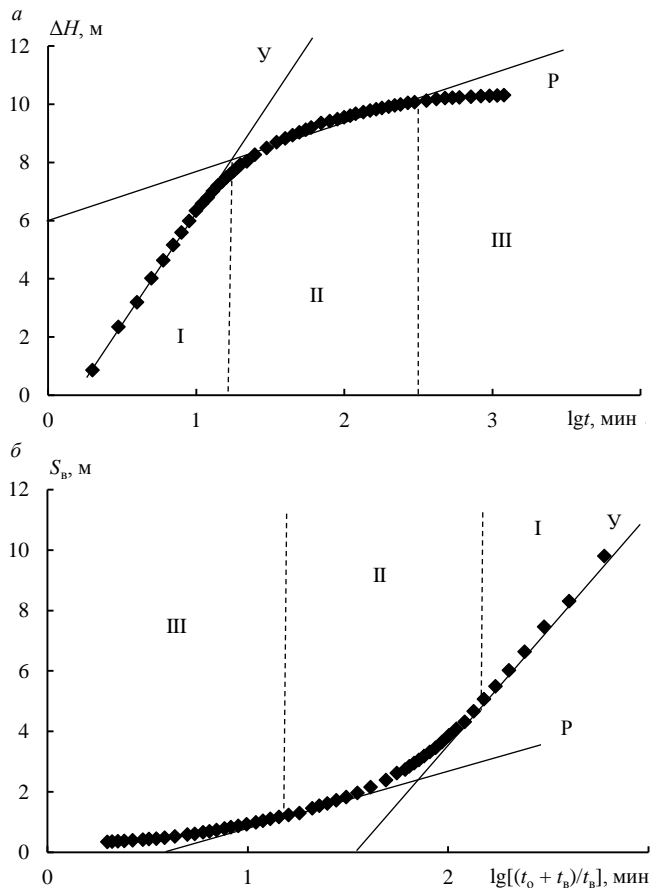


Рис. 1. Особенности интерпретации временных графиков:  $a$  – зависимость  $\Delta H - \lg t$ ;  $b$  – зависимость  $S_{\text{в}} - \lg[(t_0 + t_{\text{в}})/t_{\text{в}}]$ ; I – период влияния емкости; II – период реализации схемы безграничного пласта; III – этап стабилизации; P – расчетный участок; Y – участок для определения условного коэффициента  $C_y$

по «крутому» участку графика, отражающему период влияния емкости ствола скважины (рис. 1). В тех случаях, когда на графиках хорошо выражены участки P и Y, следует рассчитывать поправочный коэффициент  $C_y/C_p$ . Этот коэффициент можно применять для скважин, расположенных на одном участке и вскрывающих тот же водоносный горизонт [4].

Особенность обработки данных в двухслойных пластах состоит в том, что схема безграничного пласта относительно быстро переходит в схему *пласт с перетеканием*. В этом случае временной график начинает выполаживаться и может приобрести практически горизонтальный вид. В результате представительные

участки временного графика, пригодные для определения гидродинамических параметров пласта, недостаточно выражены и имеют очень короткую продолжительность.

Для правильной диагностики и выбора представительного участка временного графика необходимо максимально точно выявить период влияния емкости пласта. Данная характеристика рассчитывается с помощью зависимости (1) или на основании графика  $S_B - \lg[(t_o + t_B)/t_B]$  (рис. 1). Участок графика, деформированный влиянием емкости, отличается по форме, уклону и отделяется от представительного (расчетного) участка резким перегибом [4]. Форма временного графика позволяет достаточно точно выделить период влияния емкости скважины и момент окончания эффекта  $t_{ем}$ .

Гидродинамическая схема двухслойного пласта существенно отличается от наиболее часто применяемой схемы безграничного пласта [6, 7]. По своим гидродинамическим особенностям двухслойный пласт близок к гидродинамической схеме пласта с перетеканием из соседних водоносных горизонтов. В случае двухслойного пласта перетекание происходит из покровных образований. Развитие процесса перетекания вызывает переход нестационарного режима в режим ложной стабилизации и отражается выполаживанием временного графика.

Очень часто начальный этап периода ложной стабилизации опережает окончание периода влияния емкости скважины или совпадает с ним. Таким образом, аномалии временных графиков, связанные с началом процесса перетекания, накладываются на аномалии, связанные с влиянием емкости. Эти явления затрудняют надежную интерпретацию результатов фильтрационных опробований.

Организационно-методические особенности гидрогеологических работ связаны с определенными традициями проведения работ как по методическому содержанию, так и по общей продолжительности [1, 4, 5, 9]. При проведении ОФР используются практически всегда только одиночные скважины, хотя в поисковой и разведочной гидрогеологии (на воду) главным источником информации считаются кустовые откачки. Отсутствие наблюдательных скважин исключает или затрудняет определение таких гидродинамических параметров, как коэффициент пьезопроводности, коэффициент упругой или гравитационной водоотдачи, параметр перетекания, действующий гидродинамический радиус скважины [4, 5, 10]. Следует отметить, что без указанных гидродинамических характеристик бывает очень сложно выполнить диагностику важной гидравлической характеристики пласта – напорный или безнапорный пласт. Таким образом, использование одиночных скважин предопределяет, что достаточно надежно можно определить только водопроницаемость или коэффициент фильтрации [6, 7].

В тех случаях, когда существуют наблюдательные скважины, данные по этим скважинам очень часто трудно использовать. Указанное обстоятельство связано с тем, что в породах с низкими фильтрационными свойствами образуются небольшие депрессионные воронки, а параметр перетекания, как правило, не превышает первых десятков метров. Относительно простая интерпретация временных графиков возможна только в тех случаях, когда расстояние от центральной скважины до наблюдательной скважины составляет менее  $0,1$  параметра перетекания ( $B$ ). В реальной ситуации, при соблюдении этого условия расстояние до наблюдательной скважины должно составлять не более  $5$  м, что выполняется очень редко.

Интерпретация данных наблюдательных скважин в условиях развития процесса перетекания возможна при максимальных расстояниях от центральной до наблюдательной скважины в пределах  $(0,5-1,0)B$ . В этих случаях используются поправочные коэффициенты на значения уклонов расчетных прямых, проведенных в точках перегиба графиков [4, 5]. К сожалению, наложение эффекта влияния

емкости скважины на особенности графиков, связанные с перетеканием, очень существенно затрудняет получение правильных результатов.

Продолжительность откачек в процессе выполнения гидрогеологических работ на месторождениях полезных ископаемых бывает очень короткой. Часто длительность откачек составляет всего несколько часов. Для сравнения отметим, что при гидрогеологических работах на воду пробные откачки должны выполняться не менее одних суток. При реализации схемы двухслойного пласта ложная или окончательная стабилизация может наступать в течение первых десятков минут (до нескольких часов). По этой причине кратковременный характер откачек приносит наименьший вред по сравнению с другими особенностями и недостатками. Следует отметить, что недостаточная продолжительность откачек в первую очередь влечет за собой недостоверное определение граничных условий.

В условиях двухслойного пласта детальность измерений уровня должна быть очень частой, особенно в начальный период откачек. В первые минуты эта детальность должна составлять десятки секунд. Частота измерений определяется необходимостью выявить и отследить период влияния емкости скважины. Также очень важно выполнить правильную диагностику перехода от нестационарного к ложно-стационарному периоду откачки.

Снижение погрешности и достижение необходимой точности определения гидродинамических параметров обеспечивается реализацией специального алгоритма действий при обработке откачек. В качестве критериев, позволяющих оценить точность гидродинамических расчетов, следует использовать набор специальных характеристик. Основные характеристики включают: соотношение коэффициентов  $C_y/C_p$ , соотношение удельного дебита  $q$  и водопроницаемости  $T$  пласта, расчеты действующего гидродинамического радиуса скважины  $r'_c$  и оценку значений коэффициента пьезопроводности  $a$  и параметра перетекания  $B$  [4]. Указанные параметры, как правило, имеют характерные значения: соотношение  $C_y/C_p$  варьируется от 3 до 5, соотношение  $q/T$  обычно не превышает значения от 1 до 2, параметр перетекания ориентировочно на порядок больше, чем значение водопроницаемости. Значение коэффициента  $a$  оценивается по гидродинамической ситуации и в комплексе с параметрами  $r'_c$  и  $B$ . Если указанные характеристики соответствуют типовым значениям, то можно считать, что гидродинамические характеристики пласта и скважины рассчитаны правильно.

Таким образом, особенности геологической среды и организационно-методические отличительные черты проведения гидрогеологических исследований на стадиях разведки и подготовки к эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых предопределяют наличие существенных особенностей выполнения и интерпретации опытно-фильтрационных работ. Анализ гидрогеологической ситуации и грамотный подход к проведению работ позволяют получить всю гидродинамическую информацию, необходимую для обеспечения проектирования и эксплуатации горнодобывающих объектов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых / отв. ред. Г. Н. Кашковский. М.: Недра, 1986. 172 с.
2. Лехов М. В. Методы расчета и причины ошибочных результатов экспресс-откачек из скважин. М.: Инженерные изыскания, 2017. С. 38–50.
3. Moench A. F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers // *Water Resources Research*. 1985. Vol. 21. No. 8. P. 1121–1131.
4. Опытнo-фильтрационные работы: учеб. пособие / С. Н. Тагильцев [и др.]. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 67 с.
5. Тагильцев С. Н., Тагильцев В. С. Особенности проведения и интерпретации фильтрационных опробований при инженерных изысканиях // *Инженерные изыскания в строительстве: матер. XII Общерос. конф. изыскательских организаций*. М.: Геомониторинг, 2016. С. 409–415.

6. Синдаловский Л. Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб: СПбГУ, 2006. 396 с.
7. Шестаков В. М. Гидрогеодинамика. М.: МГУ, 2009. 368 с.
8. Тагильцев В. С. Оценка взаимосвязи размеров депрессионной воронки и дебита скважин в типовых гидрогеологических условиях // Известия вузов. Горный журнал. 2012. № 6. С. 103–107.
9. Technical Review. Practical guidelines for test pumping in water wells. International Committee of the Red Cross (ICRC), 2011. 104 p.
10. Тагильцев С. Н., Тагильцев В. С. Оценка степени гидродинамического несовершенства разведочных и эксплуатационных скважин // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 5. С. 171–176.

Поступила в редакцию 16 февраля 2018 года

## FEATURES OF PERFORMING AND INTERPRETING FILTRATION SAMPLINGS DURING HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS AT SOLID MINERAL DEPOSITS

Tagil'tsev S. N., Tagil'tsev V. S. – The Ural State Mining University, Ekaterinburg, the Russian Federation.  
E-mail: tagiltsev@k66.ru

When performing hydrogeological investigations at the stages of exploration and solid mineral deposits development, filtration samplings possess significant differences from groundwater inflow testings, which are performed during ground water exploration. The main features are determined by some distinctive characteristics of geological environment near the earth surface and organizational-methodological traditions of hydrogeological investigations, such as: two-layer bed structure, low filtration properties of rocks, low flow rates of filtration samplings, short duration of pumping, the influence of mine shaft capacity on the acquired data. Reduction of error and ensuring of required accuracy of hydrodynamic parameters determination is ensured by the realization of a special algorithm of actions when performing and processing the pumping data. The analysis of hydrogeological situation and professional work performance make it possible to acquire all hydrogeological information required to support design and exploitation of a mining facility.

**Key words:** filtration samplings; solid mineral deposits; two-layer bed structure; low filtration properties; influence of mine shaft capacity.

### REFERENCES

1. *Izuchenie gidrogeologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh uslovii mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh. Otv. red. G. N. Kashkovskii* [Investigation of hydrogeological and engineering-geological conditions of solid mineral deposits. Edited by G. N. Kashkovskii]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 172 p.
2. Lekhov M. V. *Metody rascheta i prichiny oshibochnykh rezul'tatov ekspress otkachek iz skvazhin* [The methods of calculating and the reasons for erroneous outcome of express pumping from wells]. Moscow, Inzhenernye izyskaniia Publ., 2017, pp. 38–50.
3. Moench A. F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. *Water Resources Research*, 1985, vol. 21, no. 8, pp. 1121–1131.
4. Tagil'tsev S. N., and others. *Opytno-fil'tratsionnye raboty: ucheb. posobie* [School book “Groundwater inflow testing”]. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 2005. 67 p.
5. Tagil'tsev S. N., Tagil'tsev V. S. [Features of performing and interpreting filtration samplings during engineering survey]. *Inzhenernye izyskaniia v stroitel'stve: mater. XII Obshcheros. konf. izyskatel'skikh organizatsii* [Proc. 12th All-Russ. Conf. of Survey Contr. “Engineering survey in construction”]. Moscow, Geomonitoring Publ., 2016, pp. 409–415. (In Russ.)
6. Sindalovskii L. N. *Spravochnik analiticheskikh reshenii dlia interpretatsii opytno-fil'tratsionnykh oprobovanii* [Reference book on analytical solutions for the interpretation of groundwater inflow testing]. St. Petersburg, SPbU Publ., 2006. 396 p.
7. Shestakov V. M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, MSU Publ., 2009. 368 p.
8. Tagil'tsev V. S. [Assessing the relationship of dimensions of depression hopper and discharge wells in typical hydrogeological conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2012, no. 6, pp. 103–107. (In Russ.)
9. Technical Review. Practical guidelines for test pumping in water wells. *International Committee of the Red Cross (ICRC)*, 2011. 104 p.
10. Tagil'tsev S. N., Tagil'tsev V. S. [Assessment of hydrodynamic imperfection of exploration and production wells]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2013, no. 5, pp. 171–176. (In Russ.)