

Интерпретация данных естественного электрического поля с учетом несовершенства водозаборных скважин (модельные представления)*

П. К. Коносавский, К. В. Титов

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Коносавский П. К., Титов К. В. Интерпретация данных естественного электрического поля с учетом несовершенства водозаборных скважин (модельные представления) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. Вып. 4. С. 533–543. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.408>

Проведен модельный анализ изменчивости потенциала естественного электрического поля (ЕП) при откачке из несовершенных по степени вскрытия водоносного горизонта скважин на основе программного кода GWFGEM (GroundWater Flow Geo-Electrical Mapping). Степень несовершенства фильтровой зоны скважин варьировалась в широком пределе от 1/5 мощности водоносного горизонта (короткие фильтры) до 4/5 мощности. Численные эксперименты показали, что чувствительность пространственного распределения ЕП к степени несовершенства откачивающей скважины заметно выше, чем аналогичные закономерности для понижения в пласте. Материал обсадной колонны скважины и фильтра (электропроводящее железо или непроводящий пластик) принципиально влияет на характер распределения ЕП на земной поверхности: для случая пластиковой обсадной трубы чувствительность ЕП к понижению невысока, в то время как для электропроводящей трубы распределение потенциала ЕП тесно связано с распределением понижений и может быть использовано для их оценки. Для эталонной модели (совершенной по степени вскрытия пласта скважины) характерна линейная зависимость между значениями потенциала ЕП и понижений в пласте, однако для коротких фильтров связь между ЕП и понижением — нелинейная и лучше аппроксимируется логарифмической зависимостью. В отличие от пространственных закономерностей распределения потенциала ЕП, временные закономерности показывают однотипность реакции на степень несовершенства скважины как для непроводящей (пластиковой) обсадки скважины, так и для проводящей (металлической); зависимости различаются только значениями потенциала. Эти результаты следует принимать во внимание при моделировании и интерпретации данных ЕП при откачках из скважин.

Ключевые слова: откачка, обсадка скважины, несовершенные по степени вскрытия скважины, понижение, естественное электрическое поле, численное моделирование.

* Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-17-01160 «Физико-химические модели вызванной и спонтанной поляризации применительно к опытно-фильтрационному опробованию водоносных горизонтов»).

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2018

Введение

Несовершенство водозаборных скважин по степени вскрытия фильтром водоносного пласта довольно часто встречается в гидрогеологической практике (Бронников и Куликов, 2013. Дубровский и др., 1972). Основные причины этого следующие:

- соотношение водообильности водоносного горизонта и реальной водопотребности;
- наличие высокопроницаемых зон;
- большая мощность горизонта и т. п.

В ряде случаев реальное несовершенство скважины может быть неизвестно по следующим причинам:

- у старых скважин может отсутствовать соответствующая документация;
- фильтровая зона может заливаться при эксплуатации скважины и т. п.

Несовершенство водозаборной скважины по степени вскрытия пласта приводит к возникновению дополнительного фильтрационного сопротивления, связанного с появлением вертикальной составляющей фильтрационного потока (Мироненко и Шестаков, 1978), что, в свою очередь, ведет к дополнительному понижению на скважине в сравнении с совершенной скважиной. Последнее будет определять максимальную производительность скважины. Поэтому определение реального несовершенства скважины — вполне актуальная задача.

В последние годы довольно интенсивно развивается геофизический метод естественного электрического поля (ЕП) в связи с исследованием структуры фильтрационного потока, в частности при опытно-фильтрационном опробовании (Титов и Коносавский, 2014, Rizzo et al., 2004, Soueid et al., 2016, Konosavsky et al., 2017). Естественное электрическое поле — единственное известное в настоящее время явление, по которому можно судить о потоке воды в пористой среде (в частности, в горных породах и грунтах). При фильтрации воды объемный электрический заряд, возникающий из-за превышения концентрации катионов над концентрацией анионов в диффузном слое (Титов и Коносавский, 2014), перемещается в направлении уменьшения гидравлического напора, что приводит к возникновению электрического тока механического происхождения.

Решение прямой задачи для определения потенциала ЕП состоит из двух этапов:

- 1) сначала решается прямая задача динамики подземных вод (на основе закона Дарси) при задании соответствующих граничных условий и начальных условий для нестационарной задачи;
- 2) затем решается задача распределения электрического потенциала, где источниками электрического поля являются вторичные источники гидродинамического типа (Титов и Коносавский, 2014).

Отметим, что в такой постановке решение получается для полностью водонасыщенных горных пород или грунтов в пренебрежении влияния потоков в зоне аэрации.

1. Постановка задачи и методы ее решения

В данной работе мы рассматриваем возможности интерпретации ЕП при опробовании несовершенных гидрогеологических скважин, а также чувствительность ЕП к степени несовершенства этих скважин, в том числе и к гипсометрическому положению фильтровой зоны по отношению к кровле пласта, что не всегда можно оценить на основе опытно-фильтрационных опробований.

Исследования проводились на базе численных экспериментов с использованием программного кода GWFGEM¹ (Titov et al., 2015) применительно к базовой расчетной схеме изолированного, неограниченного в плане однородного напорного водоносного горизонта. Задача решалась в профильной осесимметричной постановке (2D) для условий опробования несовершенной скважины с постоянным расходом. Геометрия модели и ее параметры приведены на рис. 1.

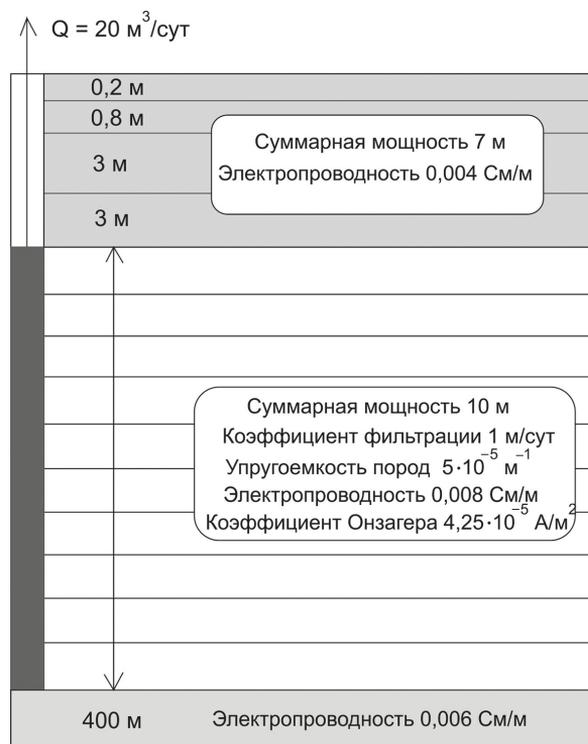


Рис. 1. Геометрия модели и ее параметры

На рис. 2 приведены различные расчетные варианты для оценки характера несовершенства скважины. Во всех вариантах геометрия модели и параметры идентичны, в том числе и расход центральной скважины: он остается постоянным, но распределяется в каждом из вариантов на соответствующее число блоков фильтровой зоны (а следовательно, и суммарная мощность электрических источников всегда остается постоянной). Базовым вариантом для сравнения различной

¹ Ground Water Flow Geo-Electrical Mapping.

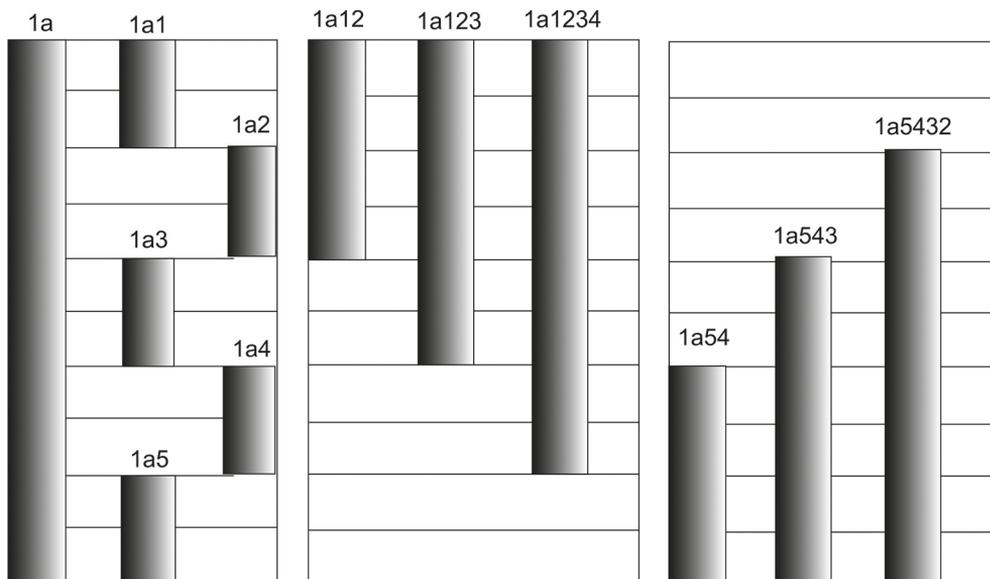


Рис. 2. Варианты несовершенства скважин по степени вскрытия пласта (цифрами указан соответствующий вариант положения фильтра относительно расчетных слоев водоносного горизонта)

степени несовершенства центральной скважины является совершенная по степени вскрытия пласта скважина (см. рис. 2, скважина 1а).

2. Результаты исследований

Особенности гидродинамической реакции пласта, обусловленные степенью несовершенства центральной скважины, напрямую зависят от соотношения l_{ϕ}/m , где l_{ϕ} — длина фильтрового интервала, m — мощность пласта. На рис. 3 показана зависимость понижения в водоносном горизонте (на уровне фильтра центральной скважины) от расстояния до откачивающей скважины для коротких фильтров при $l_{\phi}/m = 1/5$. Различия в пространственном распределении понижений напора (S) совершенной и несовершенной скважин нивелируются на расстоянии $m/2$ (где вертикальная составляющая фильтрационного потока практически исчезает). В то же время аналогичные закономерности для потенциала ЕП при $l_{\phi}/m = 1/5$ (рис. 4) характеризуются исчезновением таких различий только на расстоянии $2m$. Отсюда можно сделать вывод, что чувствительность потенциала ЕП к степени несовершенства откачивающей скважины заметно выше, чем понижение в пласте. Но если различия закономерностей распределения понижений характеризуются изменением уклона кривой $S(\lg(r))$, где r — расстояние от центральной скважины, то для потенциала ЕП это отклонение проявляется только в изменении абсолютного значения сигнала (чем ближе фильтр к поверхности земли, тем больше сигнал ЕП), что с точки зрения диагностики опытного режима откачки (и структуры фильтрационного потока вблизи откачивающей скважины) не вполне надежно (особенно с учетом реальной точности наблюдений потенциала ЕП).

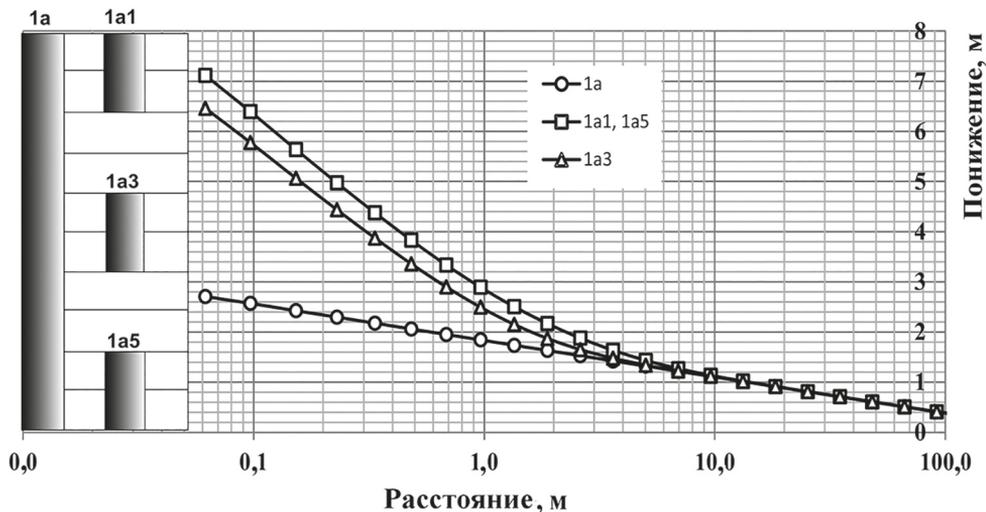


Рис. 3. Зависимость понижения в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины для коротких фильтров при $l_f/m = 1/5$

Здесь и на рис. 4, 7, 9–11 положение фильтров относительно водоносного горизонта показано слева от графика. Также здесь и на рис. 4, 6–10 для сравнения приведен график для совершенной скважины (1а).

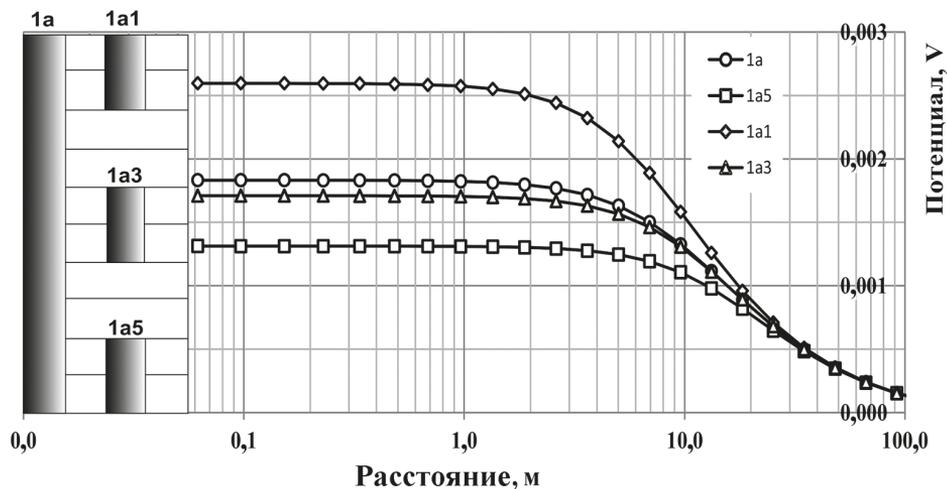


Рис. 4. Зависимость потенциала ЕП в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины для коротких фильтров при $l_f/m = 1/5$ (случай изолирующей обсадной трубы)

Зависимость значений потенциала ЕП от понижений в пласте (рис. 5) для коротких фильтров $l_f/m = 1/5$ нивелируется на расстоянии $m/2$ от центральной скважины (где сохраняются различия в понижениях для совершенной и несовершенной скважин), в пределах же этой зоны зависимость потенциала ЕП от несовершенства скважины выражается только в абсолютном значении сигнала.

Аналогичные закономерности наблюдаются при увеличении длины фильтровых интервалов $1/5 < l_f/m < 4/5$, но эти закономерности выражены тем слабее, чем ближе скважина к совершенной (рис. 6).

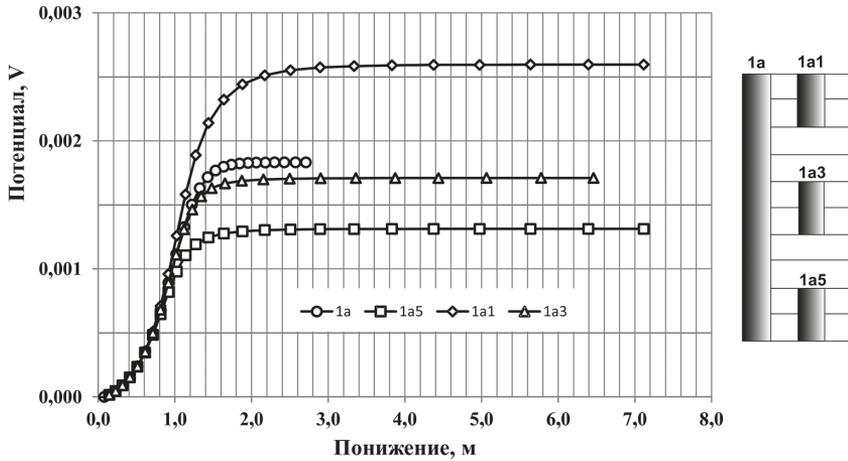


Рис. 5. Зависимость потенциала ЕП от понижений в пласте для коротких фильтров ($l_f/m = 1/5$) (случай изолирующей обсадной трубы)

Справа от графика — положение фильтров относительно водоносного горизонта.

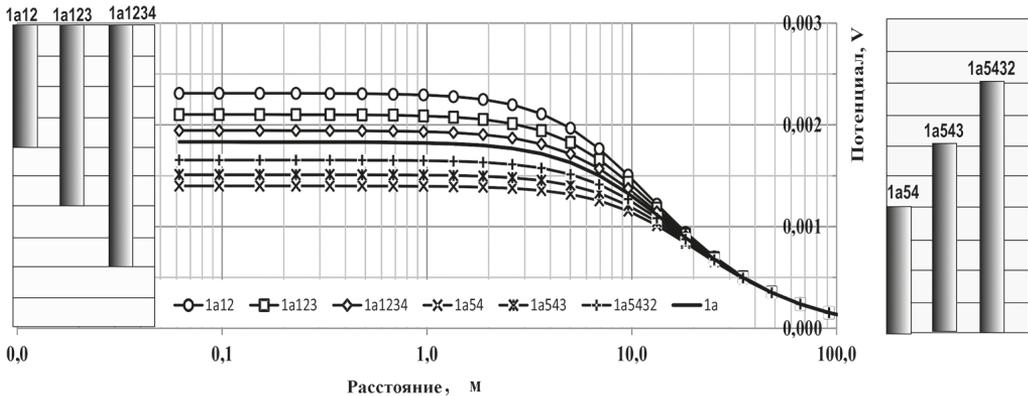


Рис. 6. Зависимость потенциала ЕП в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины ($1/5 < l_f/m < 4/5$) (случай изолирующей обсадной трубы)

Здесь и на рис. 8 слева и справа от графика показано положение фильтров относительно водоносного горизонта.

Все рассмотренное выше характеризует ситуацию, когда электрическая проводимость обсадки скважины практически равна нулю (пластиковая). При наличии электропроводящей (железной) обсадной колонны (и фильтровой зоны) закономерности развития ЕП в пласте принципиально меняются, хотя картина развития понижений в горизонте, очевидно, остается той же. На рис. 7 и 8 показана пространственная зависимость сигнала ЕП, которая теперь характеризуется изменением уклона кривой потенциала ЕП от $\lg(r)$ и гораздо бóльшими уровнями сигнала (металлическую обсадку скважины можно рассматривать как эквипотенциальную поверхность, сигнал от источников на уровне фильтровой зоны по обсадке передается на поверхность земли).

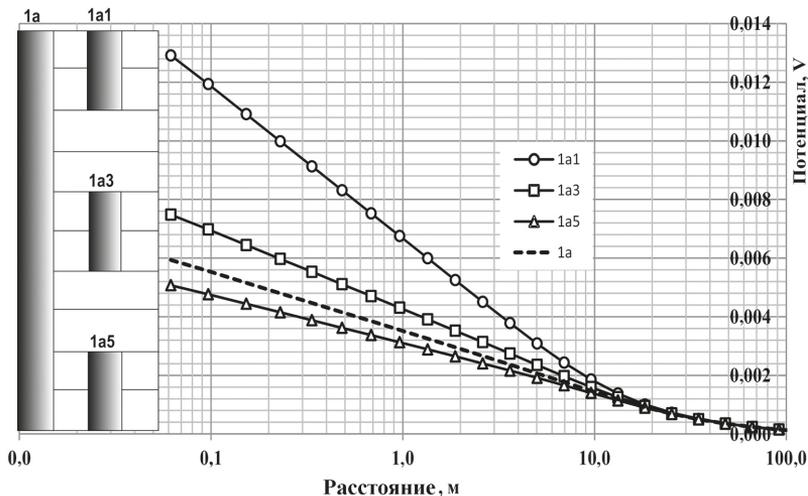


Рис. 7. Зависимость потенциала ЕП в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины при ее металлической обсадке ($l_{\phi}/m=1/5$)

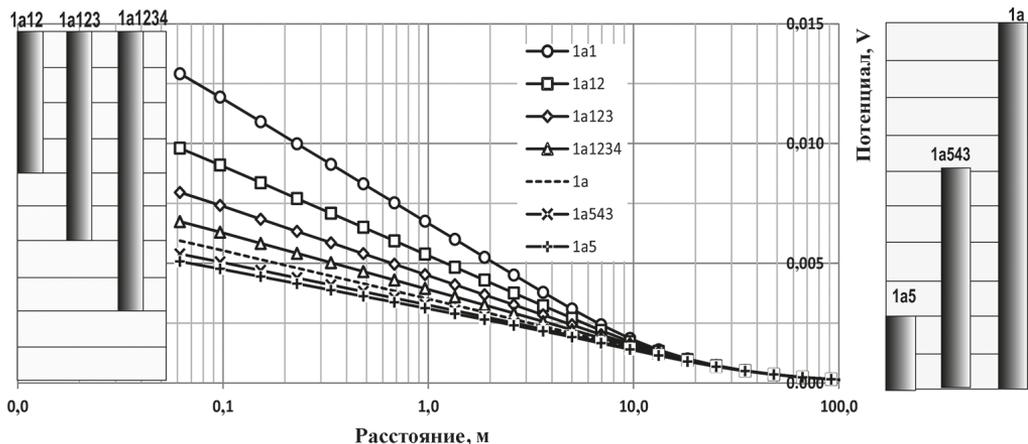


Рис. 8. Зависимость потенциала ЕП в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины при ее металлической обсадке ($1/5 < l_{\phi}/m < 4/5$)

Для эталонной модели (совершенной скважины) мы получили линейную зависимость между сигналами ЕП и значениями понижений в соответствии с ранее полученными результатами (Titov et al., 2015). Однако для коротких фильтров связь между потенциалом ЕП и понижением в пласте нелинейная и лучше аппроксимируется логарифмической зависимостью (рис. 9). С увеличением длины фильтра зависимость ближе к линейной (рис. 10).

Рассмотрение временных закономерностей изменений потенциала ЕП показывает, что зависимость потенциала от степени несовершенства скважины однотипна и для непроводящей (пластиковой) обсадки скважины, и для проводящей (железной), различаясь только значением потенциала (рис. 11).

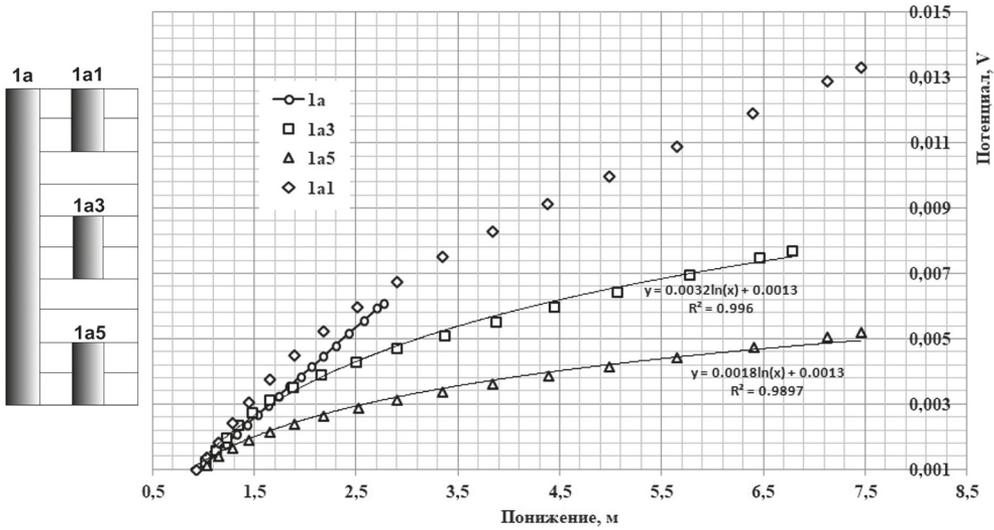


Рис. 9. Зависимость потенциала ЕП от понижений в пласте для металлической обсадки скважины ($l_{\phi}/m = 1/5$)

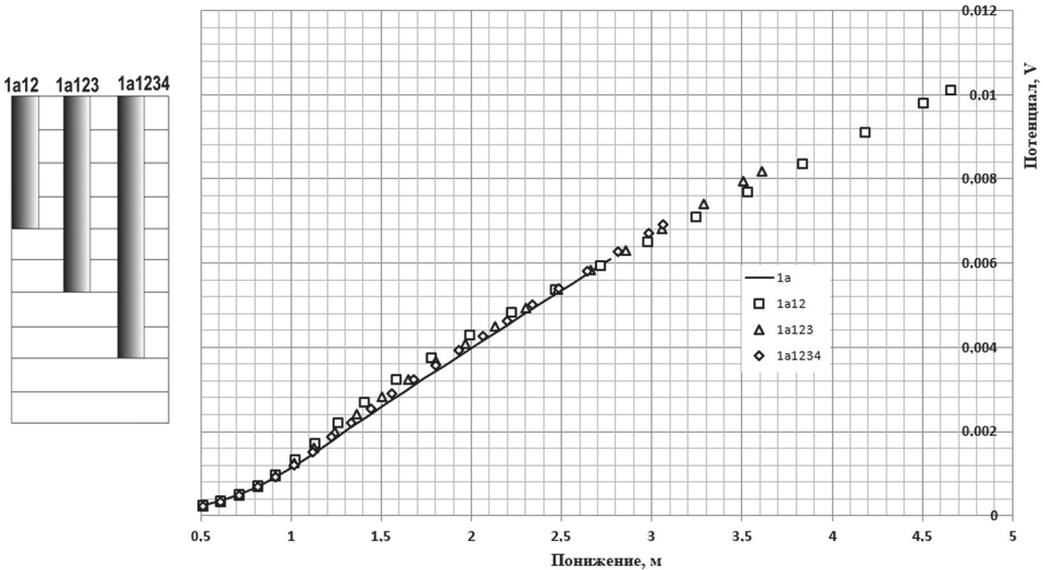


Рис. 10. Зависимость потенциала ЕП от понижений в пласте для металлической обсадки скважины ($1/5 < l_{\phi}/m < 4/5$)

Выводы

Потенциал ЕП оказался достаточно чувствительным к степени несовершенства водозаборной скважины по степени вскрытия пласта фильтром. Его чувствительность к степени несовершенства скважины даже выше, чем гидродинамическая реакция скважины.

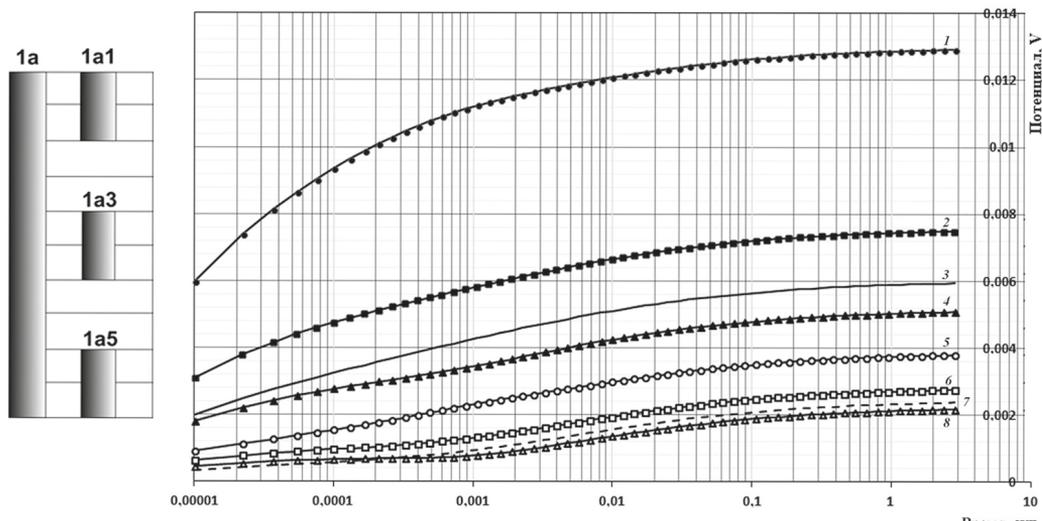


Рис. 11. Временные закономерности изменений потенциала ЕП в зависимости от степени несовершенства скважины с проводящей обсадкой:

1–4 — потенциал у скважин: 1 — 1a1, 2 — 1a3, 3 — 1a, 4 — 1a5; 5–8 — потенциал в 3,5 м от скважин: 5 — 1a1, 6 — 1a3, 7 — 1a, 8 — 1a5

Закономерности развития ЕП в пласте зависят от материала обсадки скважины: характер распределения потенциала ЕП в пласте при наличии электропроводящей (железной) обсадной колонны (и фильтровой зоны) принципиально отличается от ситуации с непроводящей (пластиковой) обсадкой, хотя картина развития понижений в горизонте, очевидно, остается той же.

Для коротких фильтров ($l_f/m \pm 1/5m$) связь между ЕП и понижением в пласте нелинейная и лучше аппроксимируется логарифмической зависимостью. С увеличением длины фильтра зависимость стремится к линейной (как для совершенной скважины).

Временные закономерности изменений потенциала ЕП показывают однотипность реакции сигнала ЭП на степень несовершенства скважины и для непроводящей (пластиковой) обсадки скважины, и для проводящей (железной), различаются только значения потенциала.

Литература

- Бронников, И. Д., Куликов, В. В., 2013. Проектирование скважин на воду: учебное пособие. МГРИ—РГГРУ, Москва.
- Дубровский, В. В., Керченский, М. М., Плохов, В. И., Ряполова, В. А., Сиднев, Я. А., 1972. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду. Недра, Москва.
- Мироненко, В. А., Шестаков, В. М., 1978. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. Недра, Москва.
- Титов К. В., Коносавский, П. К., 2014. Применение естественного электрического поля при откачках из скважин (обзор). Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 7. Геология. География (4), 52–63.
- Konosavsky, P., Maineult, A., Narbut, M., Titov K., 2017. Self-potential response to periodic pumping test: a numerical study. *Geophysical Journal International* 210, 1901–1908.

- Rizzo, E., Suski, B., Revil, A., Straface, S., Troisi, S., 2004. Self-potential signals associated with pumping tests experiments. *Journal of Geophysical Research* 109, B10203.
- Soueid Ahmed, A., Jardani, A., Revil, A., Dupont, J.-P., 2016. Joint inversion of hydraulic head and self-potential data associated with harmonic pumping tests. *Water Resources Research* 52, 6769–6791.
- Titov, K., Konosavsky, P., Narbut, M., 2015. Pumping test in a layered aquifer: numerical analysis of self-potential signals. *Journal of Applied Geophysics* 123, 188–193.

Статья поступила в редакцию 11 июня 2018 г.
Статья рекомендована в печать 15 октября 2018 г.

Контактная информация:

Коносавский Павел Константинович — konosavsky@dhsppb.ru
Титов Константин Владиславович — k.titov@spbu.ru

Interpretation of Self-Potential pumping well

P. K. Konosavsky, K. V. Titov

St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Konosavsky P.K., Titov K.V. Interpretation of Self-Potential pumping well. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2018, vol. 63, issue 4, pp. 533–543. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.408> (In Russian)

We carried out a numerical analysis of Self-Potential (SP) signals produced in the course of pumping test experiments. We studied SP responses on the basis of the GWFGEM code. In the models, the pumping well partially penetrated the aquifer. We considered the short well filters (1/5 of the aquifer thickness) and longer filters penetrated up to 4/5 of the aquifer thickness. Numerical modelling results revealed an increased sensitivity of the SP signals to the length and the depth of the pumping well filter compared to the drawdown. The pumping well casing and screen material (electrically conducting, metallic vs. electrically insulated, PVC) determines SP distributions on the ground surface. For the insulating casing, the sensitivity of SP signals to the drawdown variation is small. In contrast, SP distribution on the ground surface for the conducting case is closely related to the drawdown distribution and can serve as a proxy for the drawdown. For a reference model of the water pumping well, the relationship between SP and drawdown is linear. In the case of short screens, this relationship is logarithmic. Time variations of SP show similar patterns for all studied models for both insulating and metallic casings; only the magnitude of variations was found to be different. These results should be considered in the modelling and interpretation of SP data obtained in pumping test experiments.

Keywords: pumping test experiment, well casing, partially penetrating pumping well, drawdown, self-potential, numerical modelling.

References

- Bronnikov, I. D., Kulikov, V. V., 2013. *Proektirovanie skvazhin na vodu: uchebnoe posobie* [Designing wells for water. Tutorial]. MGRI—RGGU, Moscow. (In Russian)
- Dubrovskiy, V. V., Kerchenskiy, M. M., Plokhov, V. I., Ryapolova, V. A., Sidnev, Ya. A., 1972. *Spravochnik po bureniu i oborudovaniiu skvazhin na vodu* [Handbook of drilling and equipping wells for water]. Nedra, Moscow. (In Russian)
- Konosavsky, P., Maineult, A., Narbut, M., Titov K., 2017. Self-potential response to periodic pumping test: a numerical study. *Geophysical Journal International* 210, 1901–1908.

- Mironenko, V. A., Shestakov, V. M., 1978. Teoriia i metody interpretatsii opytно-fil'tratsionnykh rabot [Theory and methods of interpretation of pumping tests]. Nedra, Moscow. (In Russian)
- Rizzo, E., Suski, B., Revil, A., Straface, S., Troisi, S., 2004. Self-potential signals associated with pumping tests experiments. *Journal of Geophysical Research* 109, B10203.
- Soueid Ahmed, A., Jardani, A., Revil, A., Dupont, J.-P., 2016. Joint inversion of hydraulic head and self-potential data associated with harmonic pumping tests. *Water Resources Research* 52, 6769–6791.
- Titov, K. V., Konosavskiy, P. K., 2014. Primenenie estestvennogo elektricheskogo polia pri otkachkakh iz skvazhin (obzor) [Application of the self-potential during pumping tests (Review)]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 7. Geology. Geography* (4), 52–63. (In Russian)
- Titov, K., Konosavsky, P., Narbut, M., 2015. Pumping test in a layered aquifer: numerical analysis of self-potential signals. *Journal of Applied Geophysics* 123, 188–193.

Received: June 6, 2018
Accepted: October 15, 2018

Author's information:

Pavel K. Konosavsky — konosavsky@dhsppb.ru
Konstantin V. Titov — k.titov@spbu.ru