

Санкт-Петербургский государственный университет

КОНОВАЛОВА Ольга Владимировна

Выпускная квалификационная работа

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ОТКАЧКАХ ИЗ СКВАЖИН**

Основная образовательная программа бакалавриата
«Геология»

Научный руководитель: д. г.-м. н.,
профессор ТИТОВ Константин
Владиславович

Рецензент: к. г.-м. н. ХАРХОРДИН
Иван Леонидович

Санкт-Петербург
2018

Оглавление

1. Теоретические основы метода естественного поля	4
1.1. Двойной электрический слой	4
1.2. Ток и потенциал течения	6
1.2. Вычисление естественного поля, связанного с током фильтрации	6
2. Методика измерений.....	8
3. Методы численного моделирования ЕП	9
3.1. Обзор методов численного моделирования	9
3.2. Среда моделирования GWF&GEM	10
3.3. Параметры модели	13
4. Результаты.....	17
Заключение.....	26
Список литературы.....	27

Введение

Опытно-фильтрационные работы являются основным методом получения достоверной качественной и количественной информации о водоносных горизонтах и слагающих их породах. Тем не менее, полученной в результате ОФР информации практически всегда бывает недостаточно в силу высокой стоимости и длительности работ. Для получения более полных сведений привлекаются геофизические методы.

Естественное электрическое поле – один из важнейших признаков, позволяющих судить о потоке воды в грунтах и горных породах, поэтому метод естественного поля (ЕП) является одним из важнейших геофизических методов в гидрогеологии. Метод ЕП позволяет получить сведения о распределении потенциала на поверхности Земли, благодаря чему удается установить распределения гидрогеологических параметров среды.

Геофизические методы, и, в частности, метод ЕП, являются в некоторых случаях более выгодными, чем гидрогеологические, так как позволяют минимизировать расходы и сроки выполнения работ.

В последнее десятилетие за рубежом наблюдается всплеск интереса к данной теме (Rizzo, et al., 2004; Revil, 2006, 2010; Voleve, 2009; Allegre, 2012 и др.). В то же время, в России это направление еще не получило широкого распространения и русскоязычные публикации по ней немногочисленны (Титов и Коносавский, 2014).

Цель данной работы состоит в моделировании ЕП при откачках из скважин.

При этом решались следующие задачи:

- исследование зависимости электрического потенциала на поверхности от степени вскрытия скважиной водоносного горизонта;
- исследование зависимости потенциала от несовершенства скважины по характеру вскрытия водоносного горизонта, то есть при наличии кольматации фильтра скважины;
- исследование зависимости потенциала фильтрации от материала обсадной трубы.

1. Теоретические основы метода естественного поля

Метод естественного электрического поля основывается на изучении постоянного электрического поля, возникающего в результате спонтанной поляризации горных пород и руд.

Естественное поле может возникать как результат явлений различной природы. Во-первых, ЕП возникает при наличии электронного проводника, соединяющего области с различным окислительно-восстановительным потенциалом. В качестве такого проводника могут выступать сульфидные руды или графит (Семёнов, 1980). Во-вторых, электрическое поле создается при наличии контакта растворов с различной минерализацией и, соответственно, с различной подвижностью ионов в растворе. Это явление получило название «диффузионный потенциал» (Аплонов и Титов, 2012). В-третьих, естественное электрическое поле возникает при движении подземных вод в пористых горных породах – фильтрационный потенциал (Титов и Коносовский, 2014)

Таким образом, метод ЕП широко используется для поиска полезных ископаемых, для геологического картирования, при каротаже скважин, а также в гидрогеологии для определения фильтрационных свойств горных пород и установления областей преимущественной фильтрации подземных вод.

1.1. Двойной электрический слой

Фильтрационные поля относятся к классу электрокинетических явлений и в физической химии носят название «потенциала течения» (Фридрихсберг, 1984). Данное явление основывается на возникновении электрического поля при протекании жидкости в пористой среде.

На границе твердой и жидкой фазы при их взаимодействии друг с другом происходит образование двойного электрического слоя (ДЭС): ионы твердой фазы диссоциируют в раствор, а ионы жидкой фазы, наоборот, адсорбируются на поверхности твердой. Таким образом, образуется в целом электронейтральная система, при этом каждая из фаз оказывается заряжена: твердая – отрицательно, жидкая – положительно (Фридрихсберг, 1984).

Помимо этого, в жидкой фазе в результате теплового движения (диффузии), уравнивающего электростатическое притяжение катионов раствора к поверхности твердой фазы и отталкивание анионов от нее, также происходит разделение на два слоя: первый – плотный слой адсорбированных ионов (слой Штерна, слой Гельмгольца), второй – диффузный слой, представляющий собой «облако» зарядов, плотность которого убывает

по мере удаления от стенки поры (Рис.1а). Подвижность ионов в диффузном слое принимается равной подвижности в свободной воде. Толщина диффузного слоя носит название «радиус Дебая» и определяется как

$$\delta = \frac{1}{zF} \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 RT}{2C_0}}, \quad (1)$$

где z – валентность ионов, $F=9,65 \times 10^4$ [Кл/моль] – постоянная Фарадея, $\varepsilon=80$ – относительная электрическая проницаемость воды, $\varepsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$ [Ф/м] – электрическая постоянная, $R=8,31$ [Дж/(моль*К)] – универсальная газовая постоянная, T [К] – абсолютная температура, C_0 [моль/м³] – равновесная концентрация ионов в свободном растворе.

Концентрация ионов в ДЭС подчиняется распределению Больцмана:

$$C_c = C_0 \exp\left(-\frac{zF\varphi}{RT}\right), \quad (2)$$

$$C_a = C_0 \exp\left(\frac{zF\varphi}{RT}\right), \quad (3)$$

где $\varphi = \varphi_d \exp\left(-\frac{x}{\delta}\right)$ – микроскопический потенциал на стенке поры (φ_d – потенциал на внешней границе слоя Штерна, x – направление, перпендикулярное стенке поры) (Рис. 1б-в). (Фридрихсберг, 1984)

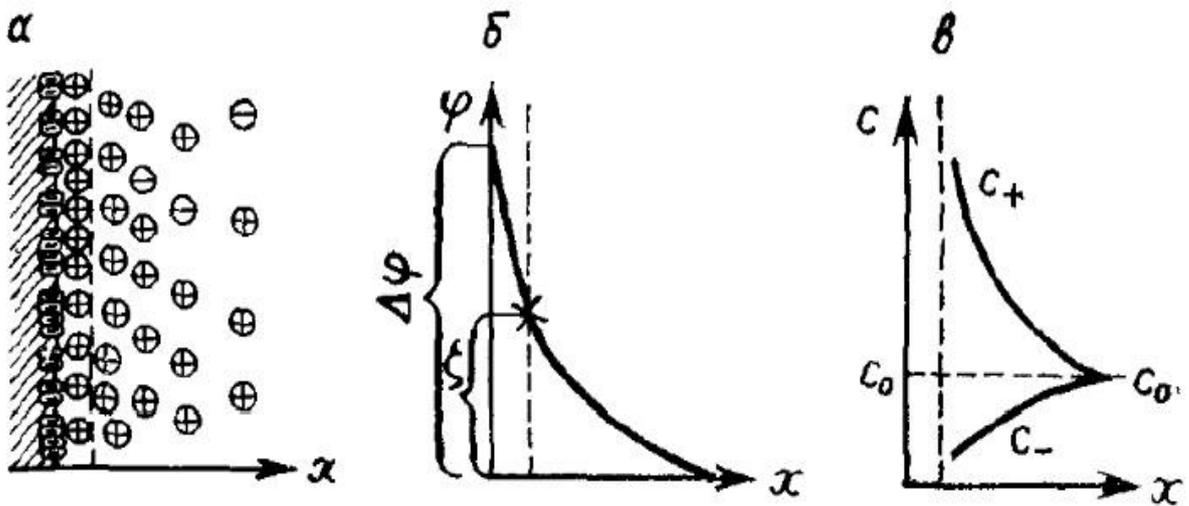


Рис 1. а – схема строения ДЭС, б – распределение электрического потенциала, в – концентрация катионов и анионов в ДЭС, (Фридрихсберг, 1984).

При этом наблюдается превышение избытка катионов над недостатком анионов, что приводит к появлению нескомпенсированного объемного электрического заряда, с плотностью

$$q = zF(C_c - C_a). \quad (4)$$

1.2. Ток и потенциал течения

Вследствие существования градиента напора, подземные воды находятся в движении, следовательно, при фильтрации происходит перемещение объемного заряда, что приводит к появлению электрического тока механической природы. Этот ток называется током течения. Помимо тока течения существует встречный ток, ток проводимости, обусловленный объемной проводимостью породы.

Возникающая на концах поры разность потенциалов и ток проводимости возрастают до того момента, пока ток течения и ток проводимости не придут в равновесие, то есть будут компенсировать друг друга. (Семёнов, 1980)

Это приводит к уравнению Гельмгольца-Смолуховского для потенциала течения (Фридрихсберг, 1984):

$$\Delta U = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta_e \sigma} \Delta P, \quad (5)$$

где η_v – вязкость воды в поре [Па·с], σ – электропроводность воды, ΔU – разность потенциалов на концах поры, ΔP – перепад давления на концах поры.

1.2. Вычисление естественного поля, связанного с током фильтрации

В макроскопическом масштабе плотность электрического тока состоит из двух компонент:

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla \varphi - l \nabla P, \quad (7)$$

где σ – электропроводность раствора, φ – напряжённость электрического поля [В], l – коэффициент тока фильтрации, равный

$$l = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta_e}. \quad (8)$$

Применительно к гидрогеологическим задачам, давление в формуле заменяется на гидростатический напор, что приводит к замене коэффициента тока течения l на модифицированный коэффициент L (Sill, 1983):

$$L = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta \rho_e g}{\eta_e}. \quad (9)$$

Тогда уравнение (7) можно записать как,

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla \varphi - L \nabla h, \quad (10)$$

где σ – электропроводность [См/м], L – модифицированный коэффициент тока течения [А/м²], φ – электрический потенциал [В], h – гидростатический напор [м].

Таким образом, первое слагаемое в этом уравнении отвечает току проводимости, второе – току течения, вызванному перепадом напоров.

В квази-стационарном приближении и с учетом закона сохранения зарядов:

$$\nabla j = 0. \quad (11)$$

Подставив уравнение (10) в (11), можно получить уравнение Пуассона для электрического потенциала в неоднородной пористой среде (Sill, 1983):

$$\mathbf{j} = \nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = -\nabla \cdot (L \nabla h). \quad (12)$$

Гидростатический напор описывается уравнением диффузии (Мироненко, 2001):

$$\nabla \cdot (K \nabla h) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q, \quad (13)$$

где K – коэффициент фильтрации [м/с], S – коэффициент упругоёмкости [м^{-1}], q – расход откачки [с^{-1}].

Подставляя уравнение (13) в (12), получим:

$$\nabla(\sigma \nabla \varphi) = -L \left(\frac{q}{K} + \frac{S}{K} \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\ln L - \ln K) \cdot \nabla h \right). \quad (13a)$$

Правая часть полученного уравнения описывает источники электрического поля: первое слагаемое отвечает гидродинамическим источникам – в данном случае, откачке из скважины, второе связано со сжатием порового пространства породы, третье характеризует вторичные гидродинамические источники, связанные с неоднородностями по коэффициенту фильтрации и модифицированному коэффициенту тока течения (Titov et al., 2005)

Для возможности применения метода естественного поля при ОФР, необходимо выявить связь между током течения и коэффициентом фильтрации. Ток течения может быть выражен через эффективную плотность заряда Q_v и скорость Дарси \mathbf{u} (Revil and Florsh, 2010):

$$-L \nabla h = Q_v \mathbf{u}. \quad (14)$$

На основании экспериментальных данных Болэв и сотрудники (Boleve, 2009) выявили связь между эффективной плотностью заряда Q_v и проницаемостью k , которая впоследствии (Soueid Ahmed et al. (2014)) была модифицирована для связи с коэффициентом фильтрации:

$$\log Q_v = -3.49 - 0.82 \log_{10} K. \quad (15)$$

Объединив уравнения (14) и (15), получим связь модифицированного коэффициента тока течения с коэффициентом фильтрации:

$$L = Q_v K = 3,24 \cdot 10^{-4} K^{0,18}, \quad (16)$$

где коэффициент фильтрации K выражен в [м/с] (Titov et al., 2015).

Уравнение (16) используется при моделировании в настоящей работе.

2. Методика измерений

Методика измерений ЕП базируется на использовании специальных неполяризуемых электродов и милливольтметров постоянного тока с высоким входным сопротивлением (Семенов, 1980).

Неполяризующийся электрод состоит из трех основных элементов:

- сосуда с пористой поверхностью (или участком поверхности), медленно пропускающей влагу для осуществления электрического контакта со средой;
- металлического электрода, опущенного в сосуд;
- раствора соли металла, из которого сделан электрод.

Следовательно, в неполяризуемом электроде контакт металла с землей осуществляется через раствор соли этого металла. При этом разность потенциалов между двумя электродами не превышает первых милливольт, и, что особенно важно, эта разность потенциалов остается стабильной. Если же металл непосредственно опускается в грунт, то между ними будет наблюдаться разность потенциалов, составляющая несколько десятков мВ, более того, она будет нестабильна вследствие окислительно-восстановительных реакций на границе электрода и грунтовой воды. (Аплонов и Титов, 2012)

Для высокоточных измерений электрического поля в конце 90-х — начале 2000-х годов были предложены электроды нового поколения, которые в настоящее время выпускаются во Франции компанией SDEC (www.sdec.fr). Неполяризуемые электроды на основе свинца и хлорида свинца отличаются высокой стабильностью и слабой чувствительностью к температуре. Использование таких электродов дает возможность уменьшить погрешность съемки ЕП приблизительно в два раза. Кроме того, использование стабильных электродов позволяет осуществлять мониторинг электрического поля, необходимый для наблюдения за быстрыми его изменениями (порядка нескольких часов или первых суток). Для этого необходимо применять неподвижную сеть электродов и многоканальный вольтметр. Потенциал измеряется относительно удаленного электрода, расположенного в месте, где вариации потенциала не наблюдаются. Такая методика наблюдений используется, в частности, при опытно-фильтрационных работах. (Титов, Коносавский, 2014)

3. Методы численного моделирования ЕП

Практическая часть данной работы состояла в математическом моделировании откачки из скважины и сопряженного электрического поля.

3.1. Обзор методов численного моделирования

За последние 15 лет наблюдается тенденция к увеличению числа исследовательских работ, посвященных данной тематике (Titov, 2002; Verube, 2004; Sheffer, 2007; Allegre, 2012 и др.). В том числе, разрабатываются новые методы и алгоритмы численного моделирования потенциала течения.

М. Darnet и G. Marquis (2003) в своей публикации показывают, что мониторинг естественного поля может быть экономически эффективным инструментом для оценки природы водопереноса (инфильтрация или эвапорация) в зоне аэрации, где стандартные методы трудно применять из-за гетерогенности среды. Моделируется распределение ЕП, возникающее при дождевой инфильтрации и эвапорации в ненасыщенном водой поровом пространстве. Модель показывает, что при этом возникают сигналы ЕП в несколько мВ, следовательно, они могут быть записаны стандартным оборудованием метода естественного поля и позволяют характеризовать восходящий и нисходящий поток воды. Справедливость модели подтверждается сравнением с реальными данными.

Типичные программные коды, основаны на 2D или 3-D алгоритмах конечных элементов или конечных разностей. Программы позволяют вычислять первичные и вторичные распределения токов в 3-D ячейке. В случае потенциала течения первичным выступает поток подземных вод, вторичным – электрический. Решение задачи происходит в три стадии. Сначала определяется распределение напоров, на основе данных о коэффициентах фильтрации при заданных граничных условиях. Затем, зная распределение напоров и модифицированного коэффициента тока течения, вычисляется распределение плотности тока. Наконец, используя сведения об источниках и распределении электропроводности, определяется распределение потенциала (Sill, 1983; Titov et al., 2002; Verube (2004)).

М. Sheffer и О. Oldenburg (2007) представили 3-D алгоритм конечных объемов, позволяющий оценить распределение потенциалов, возникающих вследствие фильтрации. Алгоритм позволяет определять распределение источников тока течения и вычислять распределение на основе решения уравнений (12) и (13) распределение потенциала на основе заданных параметров среды.

Кроме того, К. Allegre et al. (2012) рассмотрели поведение коэффициента потенциала течения C как функции водонасыщения S_w и предложили 1-D способ

моделирования в условиях неполного насыщения, объединив уравнения Ричардса для гидродинамики и уравнение Пуассона для электрического потенциала. Они применяли схему конечных элементов. Рассчитанное распределение потенциалов сравнивают с ранее опубликованными Allegre et al. (2010) результатами реальных измерений ЕП при фильтрации воды в песках. Авторы показывают, что измерение отношения $\Delta U/\Delta P$ (где ΔU – разность потенциалов, ΔP – перепад давления поровой воды в породе), позволяет оценить коэффициент потенциала течения в данных условиях. Проведенные эксперименты показали, что существующие модели коэффициента потенциала течения в условиях неполного водонасыщения обеспечивают ненадежное определение величины и поведения ЕП.

В одной из недавних работ авторы I. Oliveti и E. Cardarelli (2017) используют 2D Matlab (программный код, основанный на методе конечных элементов) для проведения численного моделирования потока подземных вод и сопряженного электрического поля. Распределение ЕП рассчитывается после решения задачи по напорам. Затем рассчитывается плотность тока и, далее – электрический потенциал. Надежность алгоритма проверяется синтетическими данными о естественном поле, возникающем при откачке из безнапорного горизонта. Также алгоритм был применен к реальным данным для локализации положения трубопровода. Результаты показывают, что данный метод дает удовлетворительный результат, хорошо согласующийся с данными реальных измерений. Таким образом к настоящему моменту разработаны различные алгоритмы решения прямой задачи ЕП для случая потенциалов течения.

3.2. Среда моделирования GWF&GEM

В данной работе численное моделирование фильтрационного потока и порождаемого им электрического поля производилось в программе GWF&GEM (Ground Water Flow & Geophysical Map, Коносовский и др., 2002).

Программа GWF&GEM (Ground Water Flow & Geophysical Map) предназначена для моделирования двухмерного (в разрезе пласта) фильтрационного потока подземных вод и порождаемого этим потоком фильтрационной составляющей естественного электрического поля (SP). Моделирование возможно в стационарной и нестационарной постановке для областей произвольной пространственной конфигурации. Режим фильтрации - напорный, напорно-безнапорный и безнапорный, электрическое поле – стационарное (предполагается, что время установления электрического потенциала значительно меньше, чем время установление напора). Характер пространственной

неоднородности моделируемой области (слой, пласт, бассейн) по фильтрационным и электрическим параметрам - также произвольный.

Программа предназначена:

- для оценки возможности применения ЕП для исследования потока подземных вод на этапе планирования и проведения полевых работ;
- для калибровки моделей фильтрации подземных вод на основе электрического потенциала, возникающего при фильтрации в пористой среде.

В основе программы лежит конечно-разностная схема решения дифференциальных уравнений в частных производных. (Коносавский, и др., 2002)

В данной программе реализованы четыре стандартных рода граничных условий для задачи фильтрации и три рода для задачи потенциала.

Интерфейс GWF&GEM предоставляет возможность достаточно быстро подготовить набор исходных данных, которые представляются в данной программе в виде матриц. Помимо этого, предусмотрены графические функции для анализа результатов расчёта. Для связи с другими программными пакетами имеется возможность представления данных моделирования в формате программы SURFER (для построения карт напора подземных вод в изолиниях), импортирование матриц по всем фильтрационным и электрическим параметрам в отдельные файлы (для связи с другими моделирующими программами).

Программа GWF&GEM условно состоит из трех частей, связанных между собой единым интерфейсом:

- модуль подготовки файла исходных данных;
- модуль расчётной процедуры;
- модуль анализа результатов моделирования.

Модуль подготовки исходных данных для моделирования использует системное меню программы и позволяет в диалоговом режиме сформировать файл данных (Рис.2)

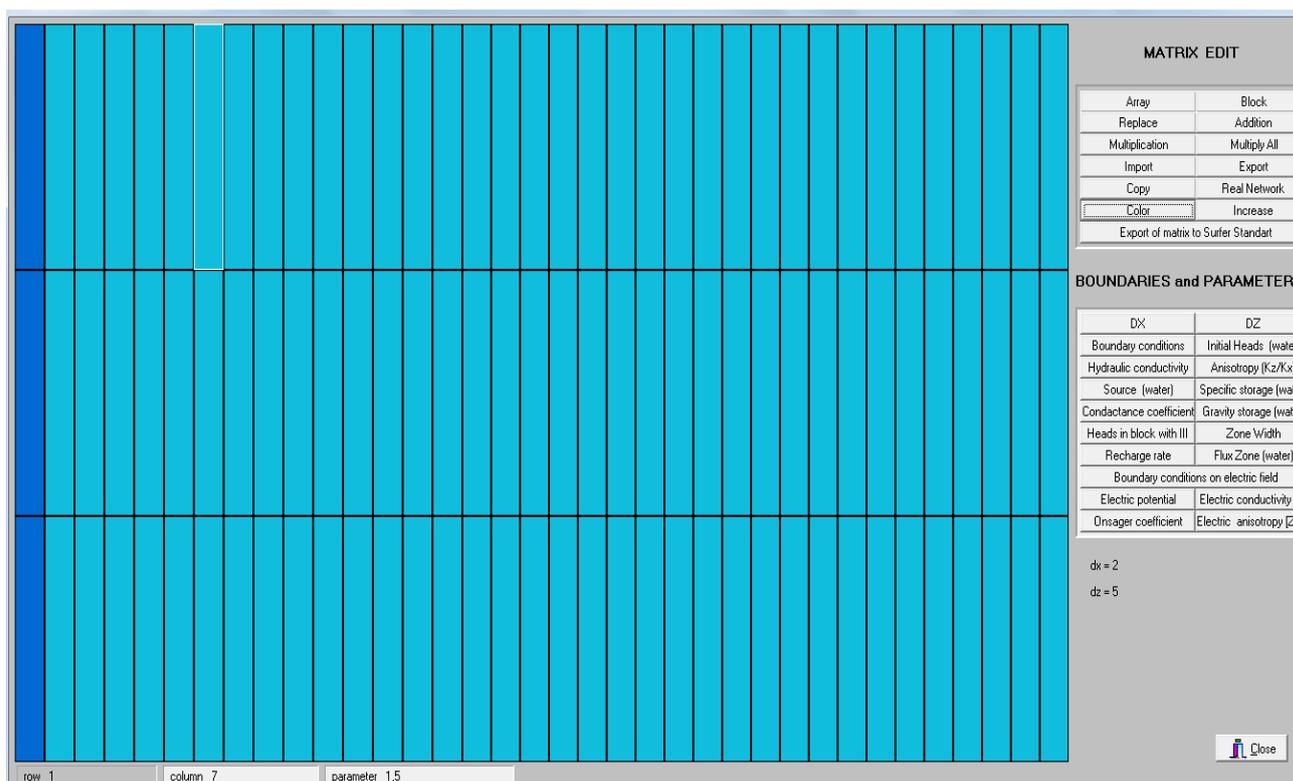


Рис. 2. Модуль подготовки исходных данных в программе GWF&GEM.

Расчетный модуль программы включает в себя пять блоков:

- блок расчета коэффициентов системы алгебраических уравнений, формирующий матрицу коэффициентов при неизвестных значениях напоров подземных вод и электрических потенциалов;
- блок итерационной процедуры, где выполняется решение системы уравнений (организован в виде двух модулей по последовательному расчету H и U);
- блок расчета балансовой невязки модели на итерациях;
- блок анализа условий сходимости расчетной процедуры;
- блок, выполняющий функции диспетчера (управляющего) по организации совместной работы четырех вышеперечисленных блоков. (Коносавский, и др.)

Модуль анализа расчетных результатов позволяет быстро определить расчетные значения напоров и потенциалов в любой точке модельной области и получить информацию о распределении потенциала в модели. (Коносавский, и др.)

Реализуемая в программном коде GWF&GEM блок-схема численного решения электрокинетической задачи представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Блок-схема численного решения электрокинетической задачи (Titov et al., 2002).

3.3. Параметры модели

При откачке из скважины вода, поступающая из водоносного горизонта, является источником электрического поля в соответствии с правой частью уравнения (12). В областях нестационарного потока, ограничивающих воронку депрессии, возникают источники противоположного знака, отвечающие левой части уравнения (12) (Титов, Коносавский, 2014).

В ходе работы была рассмотрена трехслойная модель откачки из безграничного напорного горизонта. Основные горизонты разделялись на несколько расчетных слоев для учета вертикальной составляющей потока (рис. 4). Модель рассматривается в предположении, что её внешние границы - непроницаемы.

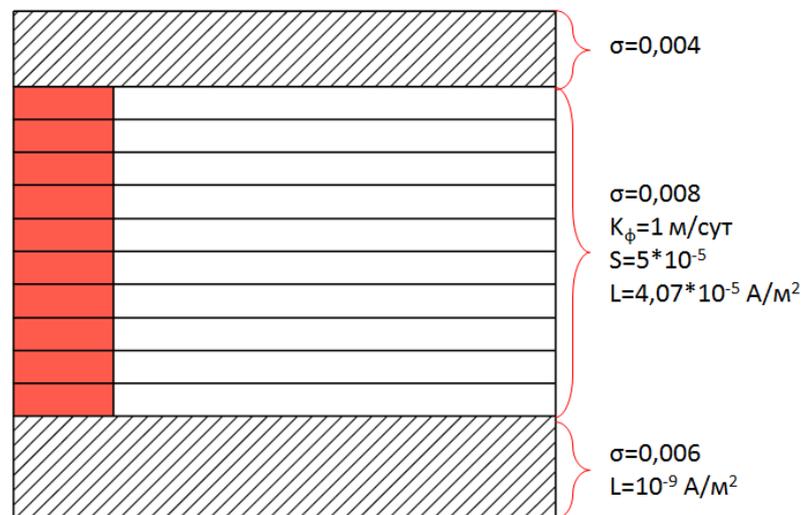


Рис. 4. Геометрия и основные параметры модели откачки из безнапорного горизонта.

Рассматривалось 2 типа обсадной трубы (металлическая и пластиковая, существенно отличающиеся по электропроводности) и 2 типа несовершенства (по степени и по характеру вскрытия водоносного горизонта).

Скважина называется несовершенной по степени вскрытия, если она вскрывает водоносный пласт не на всю мощность, при этом осуществляется непосредственный контакт скважины с пластом. Несовершенство по характеру вскрытия водоносного горизонта выражается в присутствии обсадной трубы или фильтра, то есть связь между пластом и скважиной осуществляется не через открытую боковую поверхность, а только через перфорационные отверстия. Это часто сопровождается кольматацией фильтра, то есть забиванием отверстий глинистыми частицами. В таком случае наблюдается понижение проницаемости пород в призабойной зоне (участок пласта, примыкающий к стволу скважины) по отношению к естественной проницаемости.

Для создания модели была выбрана разбивка с постепенным увеличением по логарифмическому закону размеров блоков вдоль оси X; размеры блоков изменяются от 0,02 до 732 м, покрывая весь радиус влияния скважины, рассчитанный аналитически. Такая разбивка помогает более точно фиксировать изменение напора и ЕП вблизи скважины.

Вдоль оси Z каждый ряд блоков имеет свою мощность. Верхний, приповерхностный слой пород, перекрывающих водоносный горизонт, разделен на 5 рядов общей мощностью в 5 м. Сам водоносный горизонт имеет мощность 10 метров и разделен на 10 рядов равной мощности. Общая мощность слоёв, подстилающих водоносный горизонт, составляет 787 м. Ширина блоков в системе с радиальной симметрией рассчитывается как $width = 2\pi r$, где r – расстояние от скважины до центра блока.

В ходе работы было рассмотрено два варианта обсадной трубы: металлическая и неметаллическая (пластиковая).

Для каждого варианта было построено по 18 моделей, учитывающих различное положение фильтра в скважине, а также кольматацию фильтра (рисунок 5):

- а) в породах присутствует одна водозаборная скважина, совершенная по степени вскрытия водоносного горизонта (рис. 5а) (положение «0»):
 - скважина совершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта;
 - скважина несовершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта, коэффициент фильтрации в призабойной зоне (на рисунке 5а показана перекрестной штриховкой $k_f = 0,1$ м/сут;

- скважина несовершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта, коэффициент фильтрации в призабойной зоне $k_f = 0,01$ м/сут.
- б) в породах присутствует водозаборная скважина, несовершенная по степени вскрытия водоносного горизонта (рис. 5б): рассматривается пять различных положений фильтра (положения «1» – «5»), для каждого положения моделируются следующие ситуации:
- скважина совершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта, кольматация фильтра отсутствует;
 - скважина несовершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта, коэффициент фильтрации в призабойной зоне (на рисунке 5б показана перекрестной штриховкой соответствующего каждому положению фильтра цвета) $k_f = 0,1$ м/сут;
 - скважина несовершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта, коэффициент фильтрации в призабойной зоне $k_f = 0,01$ м/сут.

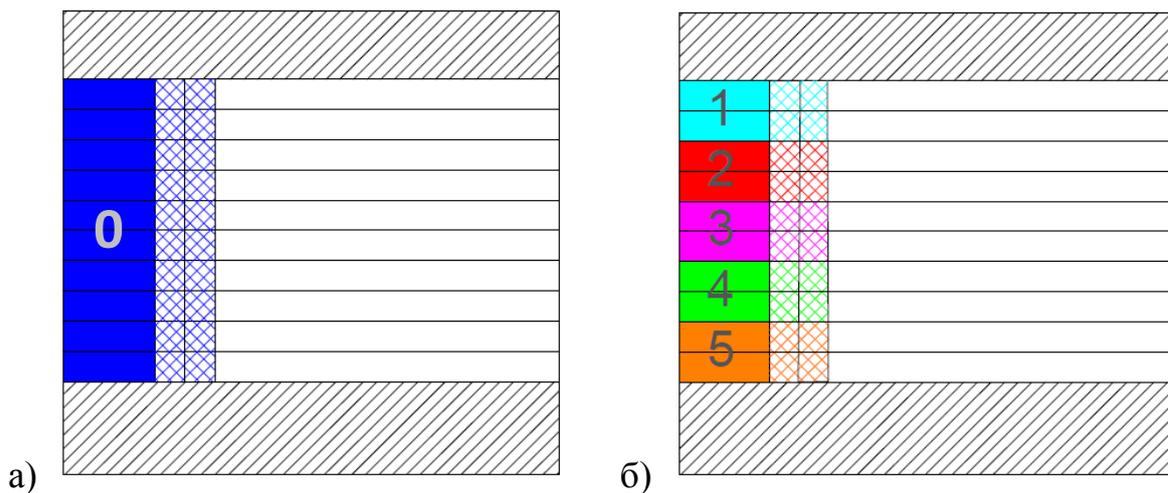


Рис. 5. Схемы расположения фильтров скважины и призабойной зоны: а – скважина, совершенная по степени вскрытия, б – скважин, несовершенная по степи и характеру вскрытия. Сплошной штриховкой показано расположение фильтра, перекрестной штриховкой – положение зоны пониженной проницаемости при соответствующих положений фильтра.

Коэффициент фильтрации водоносного горизонта составляет 1 м/сут, для выше- и нижележащих слоев поток отсутствует и коэффициент фильтрации принимается равным нулю. Для фильтра скважины устанавливается коэффициент фильтрации 100 м/сут. Начальный гидравлический напор в водоносном горизонте составляет 902 м. При рассмотрении случая, когда скважина несовершенна по характеру вскрытия водоносного горизонта и коэффициент фильтрации в призабойной зоне составляет 0,01 м/сут, начальный напор увеличен до 1902 м, чтобы избежать «осушения» скважины. Скорость

откачки для всех моделей с металлической обсадкой труб составляла $100 \text{ м}^3/\text{сут}$. Модифицированный коэффициент тока течения (коэффициент Онзагера) электропроводности вычислялся по формуле (16). Для водоносного горизонта он составил $4,19 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$, для подстилающих слоев – 10^{-9} А/м^2 . В прифилтровой зоне устанавливались коэффициенты $2,78 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$ и $1,82 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}^2$ для случаев №1 и №2 соответственно. Время откачки составило 2,82 суток.

Основные параметры моделей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры моделей.

Параметры модели	№1	№2	№3
Начальный напор, [м]	902	902	1902
Коэффициент фильтрации водоносного горизонта, [м/сут]	1		
Коэффициент фильтрации вблизи фильтра, [м/сут]	1	0,1	0,01
Электропроводность пород водоносного горизонта, [См/м]	0,002		
Модифицированный коэффициент тока течения, [А/м ²]	$4,19 \cdot 10^{-5}$		
Модифицированный коэффициент тока течения вблизи фильтра, [А/м ²]	$4,19 \cdot 10^{-5}$	$2,78 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Расход скважины, [м ³ /сут]	100		

4. Результаты

В результате численного моделирования было рассмотрено 36 моделей распределения на поверхности естественного электрического поля, создаваемого при фильтрации подземных вод в процессе откачки из скважины.

Были промоделированы два типа обсадных колонн скважины (проводящая и непроводящая) и шесть вариантов расположения фильтра скважины:

- 1) породы вскрыты скважиной, совершенной по степени вскрытия водоносного горизонта;
- 2) породы вскрыты скважиной, несовершенной по степени вскрытия водоносного горизонта при пяти вариантах расположения фильтра (см. раздел 3.3).

Материал обсадной колонны не влияет на понижение напора в водоносном горизонте. Таким образом, для обоих типов труб для различных положений фильтров наблюдается следующая зависимость: понижение достигает максимальных значений в центре водозаборной скважины, затем, при удалении от скважины, наблюдается резкий спад, а далее постепенное приближение к начальным значениям напора (рис. 6).

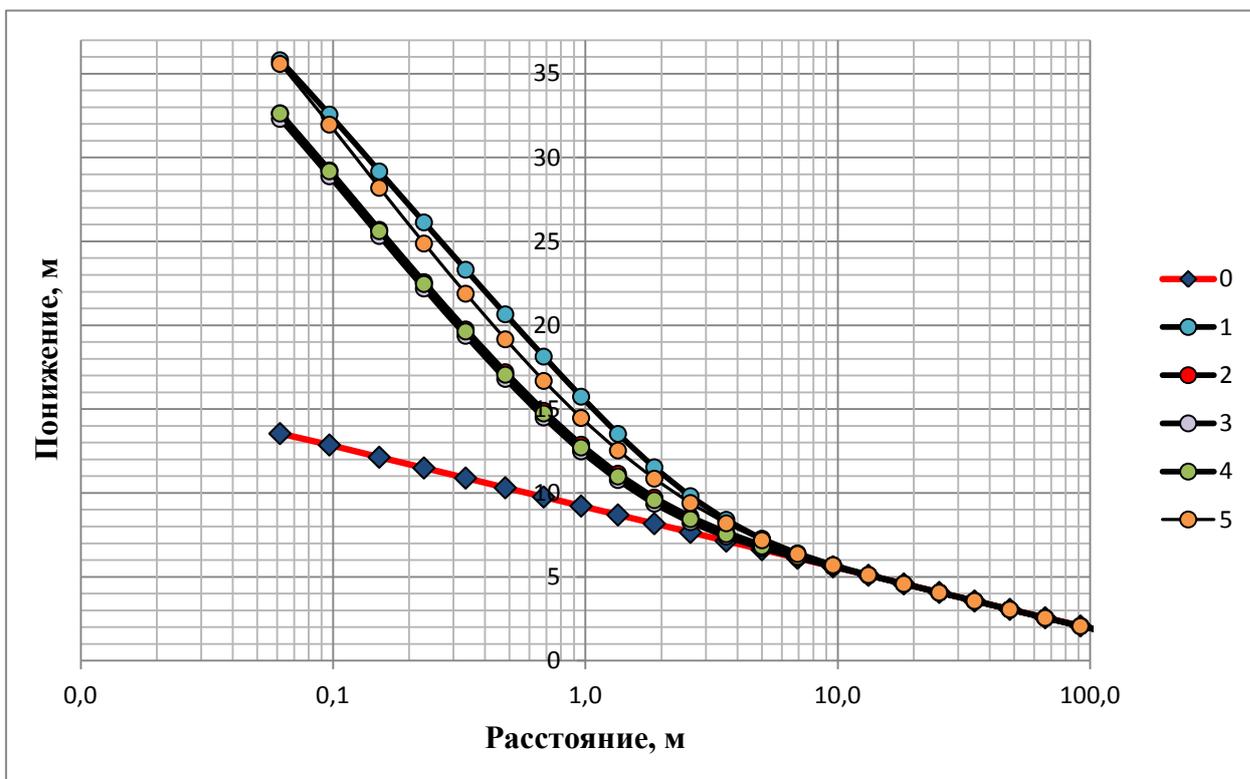


Рис. 6. Зависимость понижения напора от расстояния от скважины. Номера соответствуют моделям на рис. 5.

Аналогичное поведение демонстрируют кривые потенциала для случая металлической обсадной колонны (рис. 7).

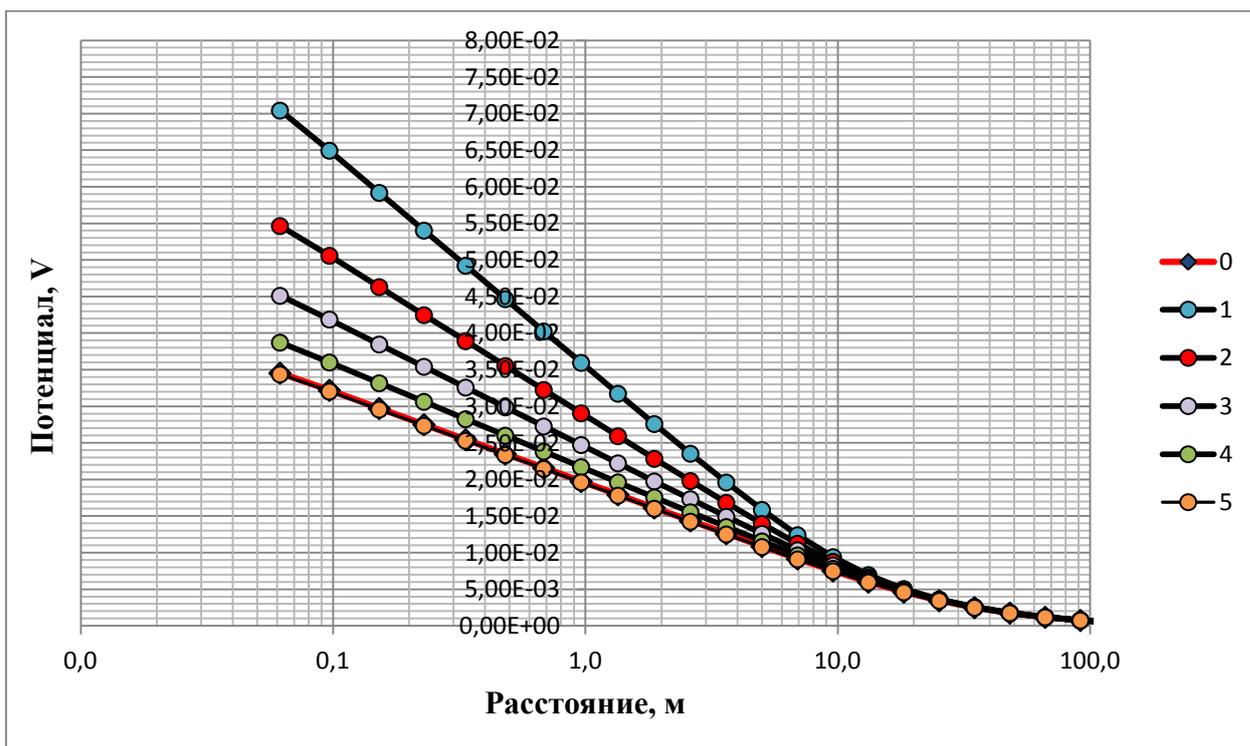


Рис. 7. Зависимость потенциала от расстояния от скважины с металлической обсадной трубой.

Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Для случая неметаллической обсадной колонны наблюдается иной характер распределения потенциалов на поверхности (рис. 8).

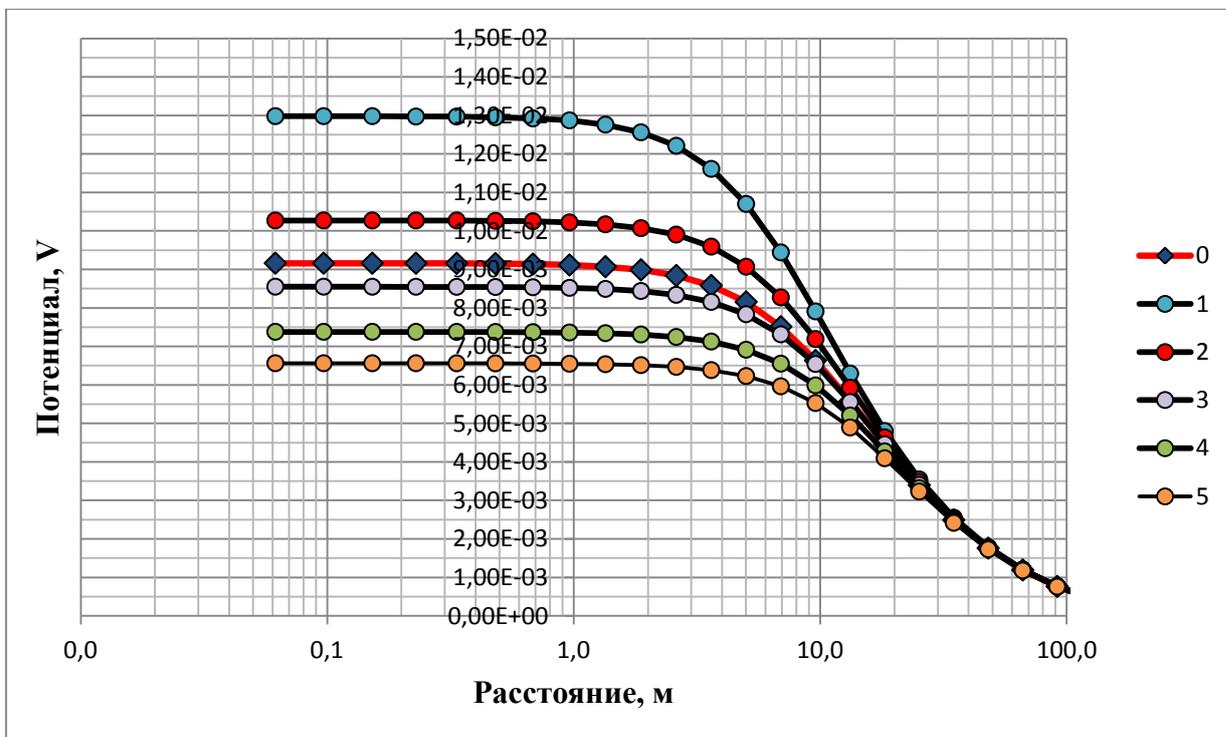


Рис. 8. Зависимость потенциала от расстояния от скважины с неметаллической обсадной трубой.

Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Как видно из графиков, для всех 6 вариантов расположения фильтра наблюдается практически неизменное значение потенциала вблизи скважины, только на расстоянии 2-3 метра начинается резкий спад и приближение значений к 0 В.

Сигнал при откачке из скважины, несовершенной по степени вскрытия водоносного горизонта (кривые 1-5), может и увеличиваться, и уменьшаться относительно сигнала, измеряемого при откачке скважины, совершенной по степени вскрытия (кривая 0). Расход для всех вариантов одинаков, поэтому в верхней части разреза сигнал выше, а с увеличением глубины источника (и, соответственно, расстояния до поверхности земли) сигнал ослабевает.

Если рассмотреть корреляционную зависимость между изменением потенциала и понижением напора, можно отметить, что в случае пластиковой обсадной трубы при постоянном потенциале могут наблюдаться различные понижения напора (рис. 9).

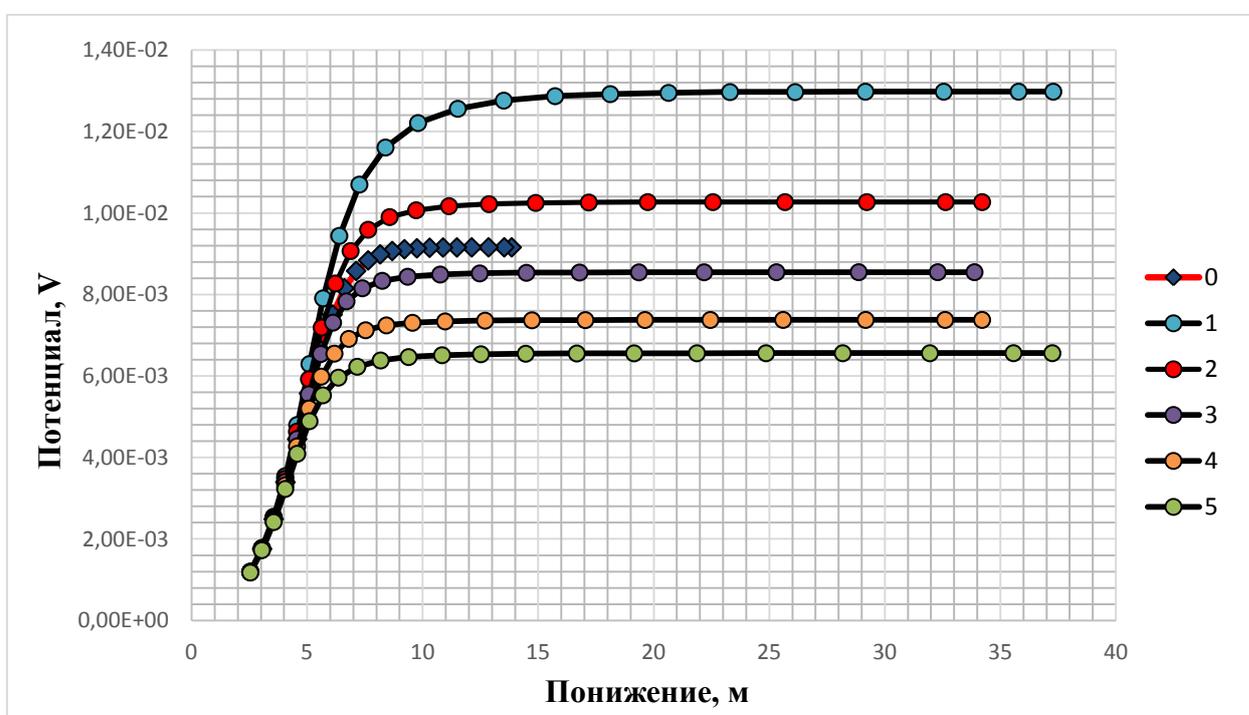


Рис. 9. Зависимости между потенциалом и понижением напора для случая непроводящей обсадной трубы. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Таким образом, при наличии неметаллической обсадной трубы вблизи от скважины ЕП не связано с напором в водоносном горизонте. Эта связь появляется лишь при расстоянии от скважины превышающем 10 м.

В случае металлической обсадной трубы для диапазона значений потенциала, которые могут быть измерены в полевых условиях, зависимости близки к линейным, коэффициенты корреляции превышают 0,94 (рис. 10).

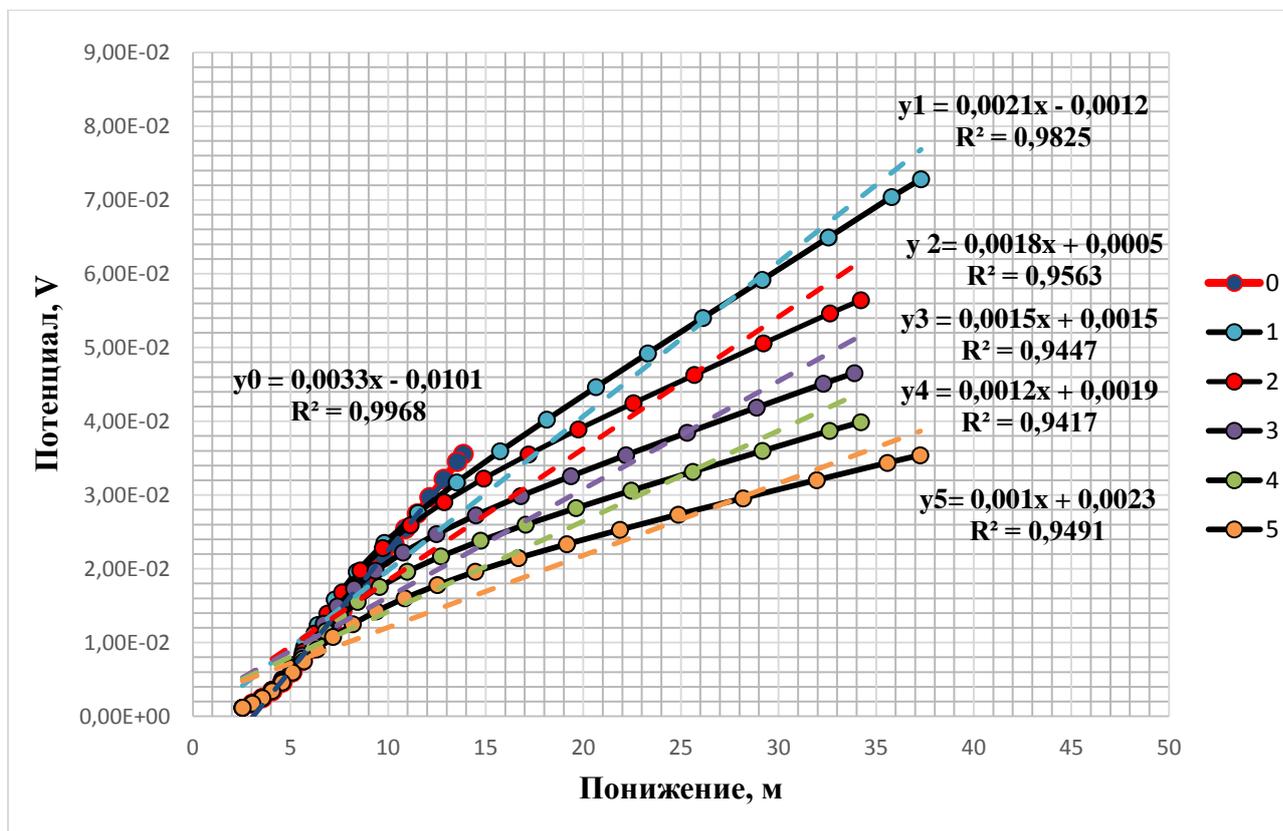


Рис. 10. Зависимость между потенциалом и понижением напора. Пунктиром обозначены линии тренда. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Модельные поля отличаются по значениям углов наклона зависимостей потенциала от понижения, благодаря чему данные измерения ЕП могут использоваться для оценки изменения напоров в водоносном горизонте. Иначе говоря, зная расположение фильтра, оказывается возможным выбрать одну из зависимостей и предсказать понижение напора в водоносном горизонте по зависимостям, подобным тем, которые показаны на рисунке 10.

Для учета влияния несовершенства скважин по характеру вскрытия горизонта на распределение ЕП рассматривалось 2 ситуации: понижение коэффициента фильтрации вблизи фильтра до 0,1 м/сут и до 0,01 м/сут.

Как и в предыдущем случае, для двух типов обсадной колонны распределение напоров одинаково. При наличии кольматации фильтра отмечается резкое понижение напора вблизи скважины, связанное с уменьшением притока воды в скважину из-за понижения коэффициента фильтрации в прифильтовой зоне (рис. 11, 12).

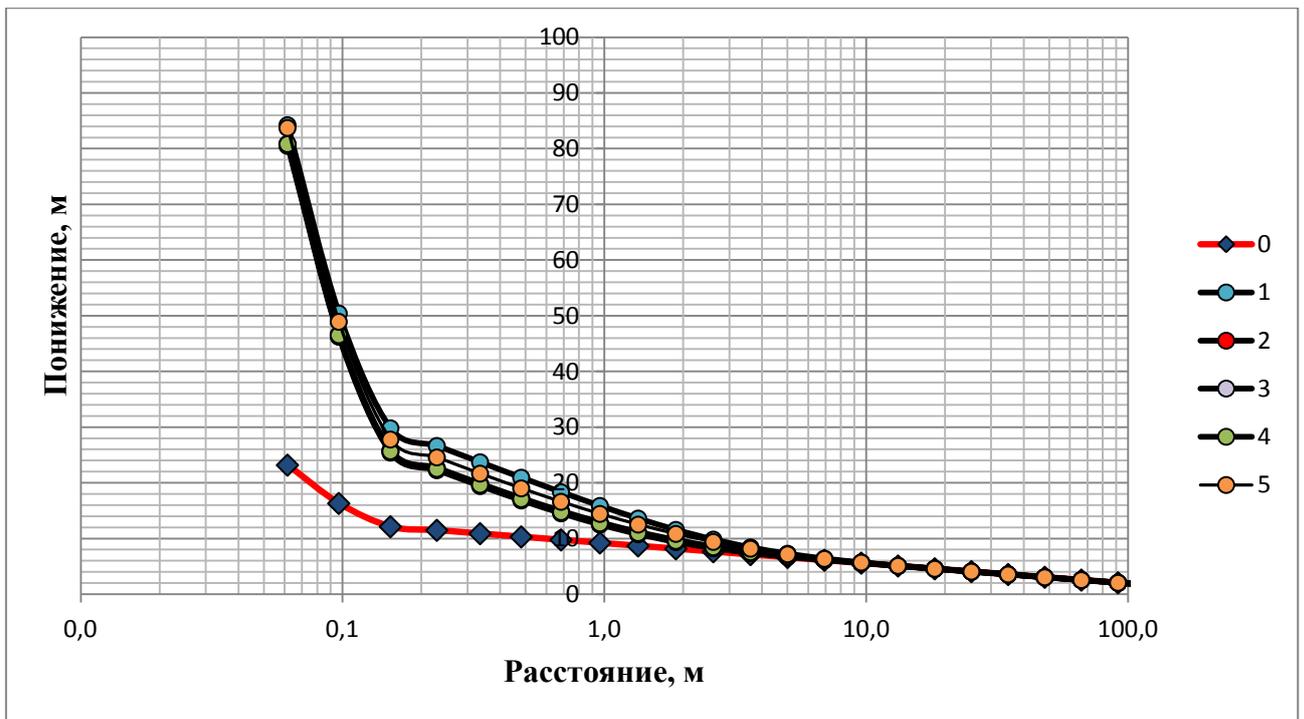


Рис. 11. Зависимость понижения напора от расстояния от скважины при понижении k_f вблизи фильтра до 0,1 м/сут. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

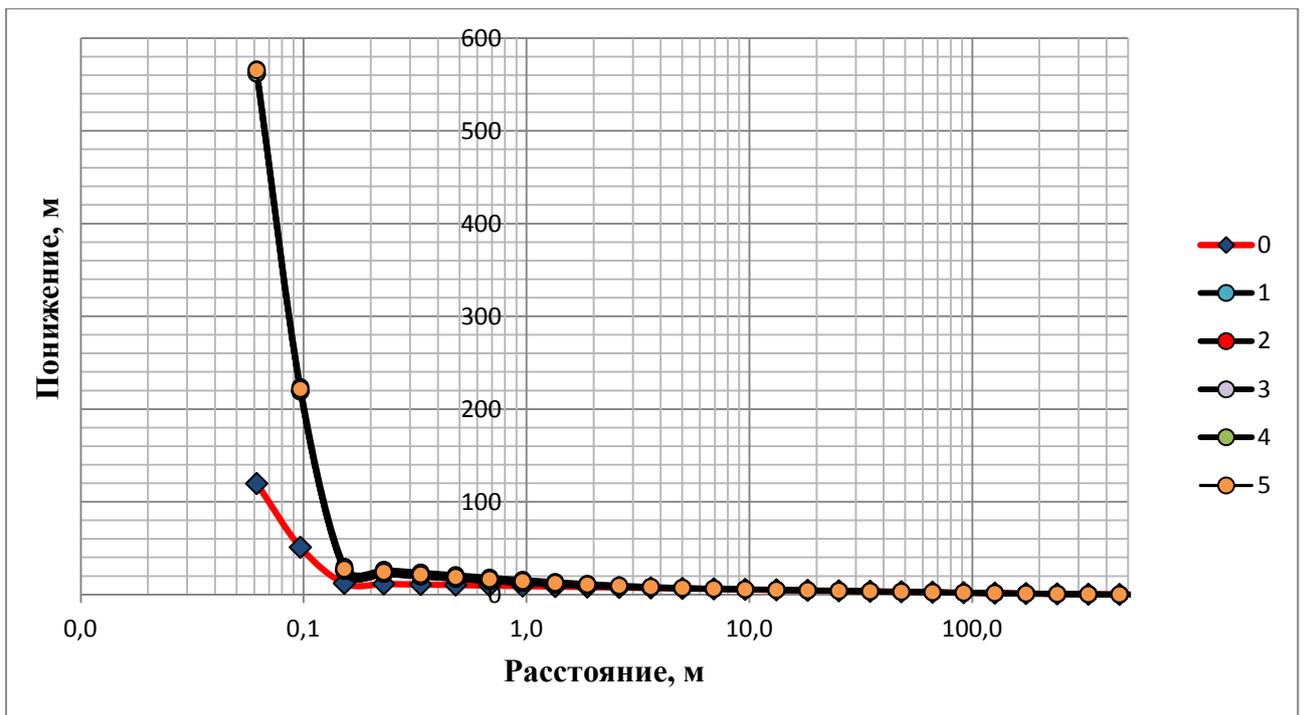


Рис. 12. Зависимость понижения напора от расстояния от скважины при понижении k_f вблизи фильтра до 0,01 м/сут. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Если рассмотреть зависимость потенциала от понижения напора, то для ситуации с неметаллической обсадной колонной видно, что поведение потенциала в этих обоих случаях (рис. 13, 14) качественно не отличается от случая без кольматации (рис. 9).

Отличие заключается лишь в амплитуде сигнала вблизи скважины, что связано с более высокими понижениями напора в этой области (рис. 11, 12).

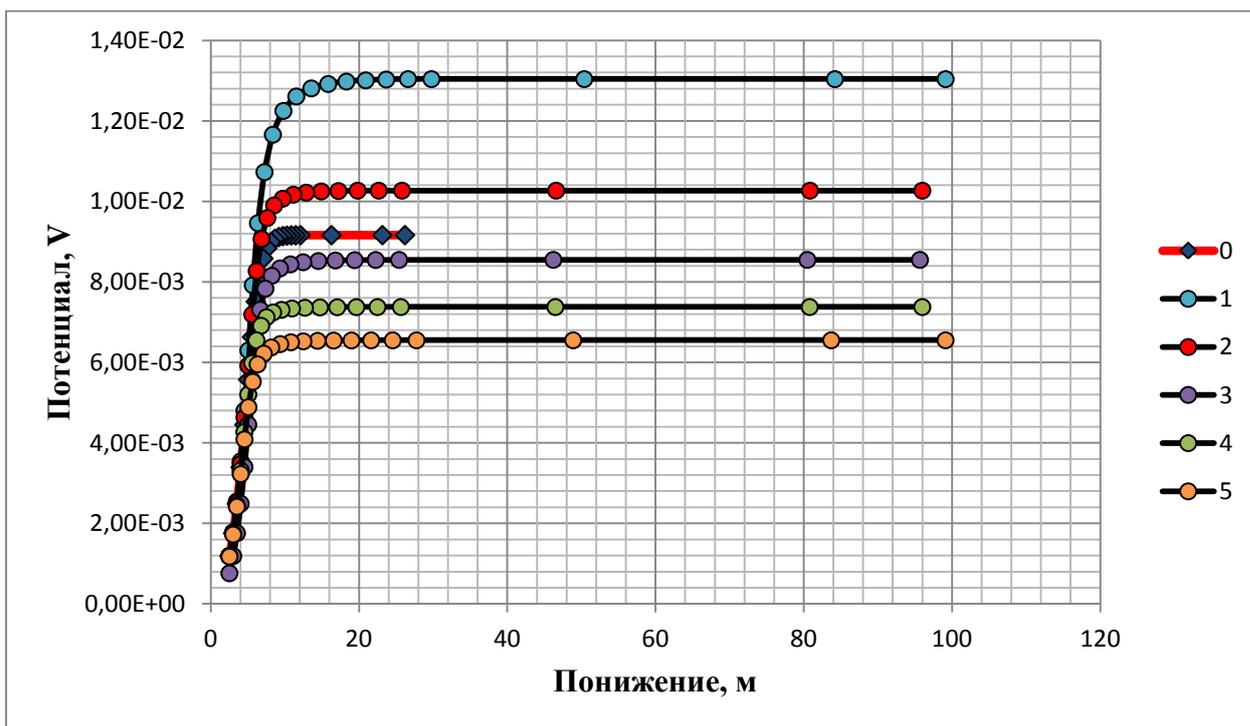


Рис. 13. Зависимость между потенциалом и понижением напора для случая неметаллической обсадной трубы при понижении k_f вблизи фильтра до 0,1 м/сут. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

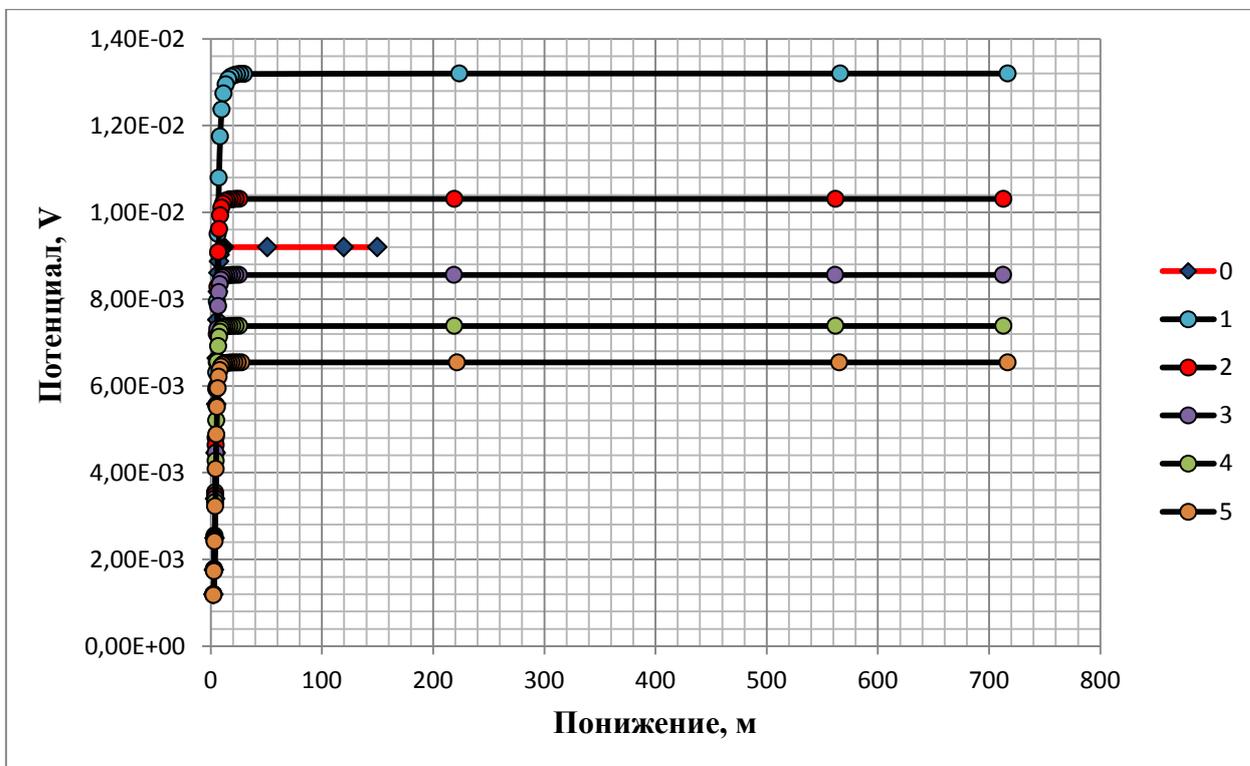


Рис. 14. Зависимость между потенциалом и понижением напора для случая неметаллической обсадной трубы при понижении k_f вблизи фильтра до 0,01 м/сут. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Совершенно другое поведение демонстрируют кривые для металлической обсадки (рис. 15, 16): наблюдается явное отклонение зависимости между потенциалом и понижением напора от линейной, выявленной ранее (рис. 10) для случая, не учитывающего кольтатацию фильтра, на кривых наблюдается излом.

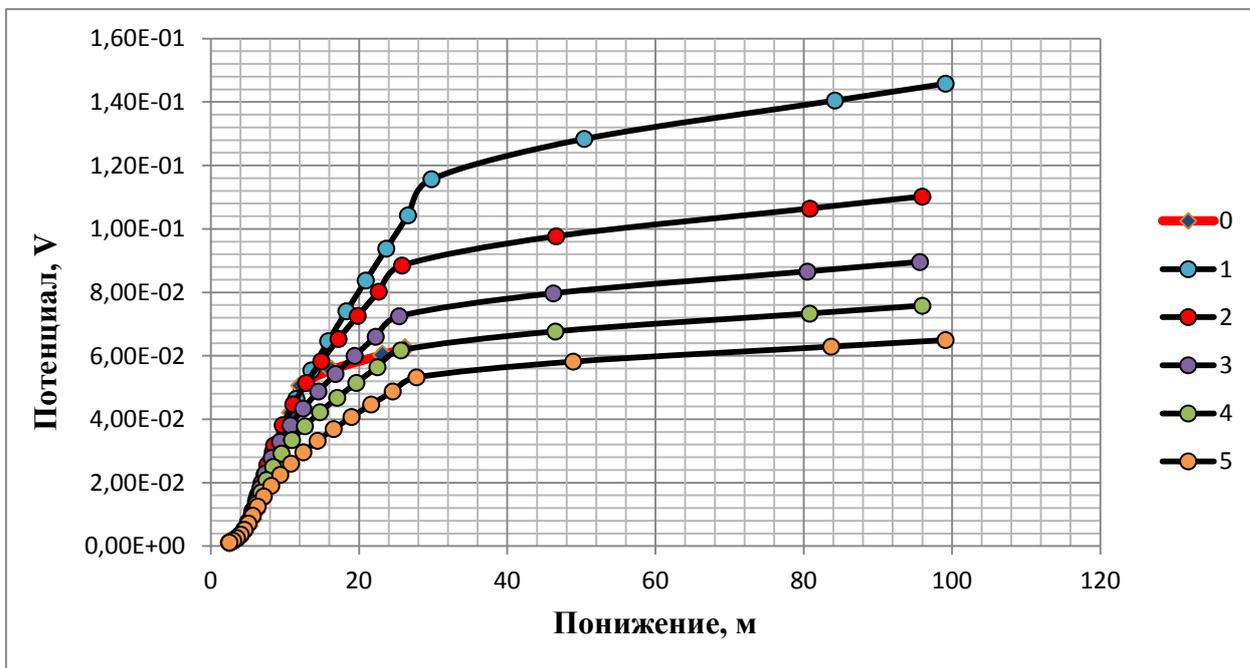


Рис. 15. Зависимость между потенциалом и понижением напора для случая металлической обсадной трубы при понижении k_f вблизи фильтра до 0,1 м/сут. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

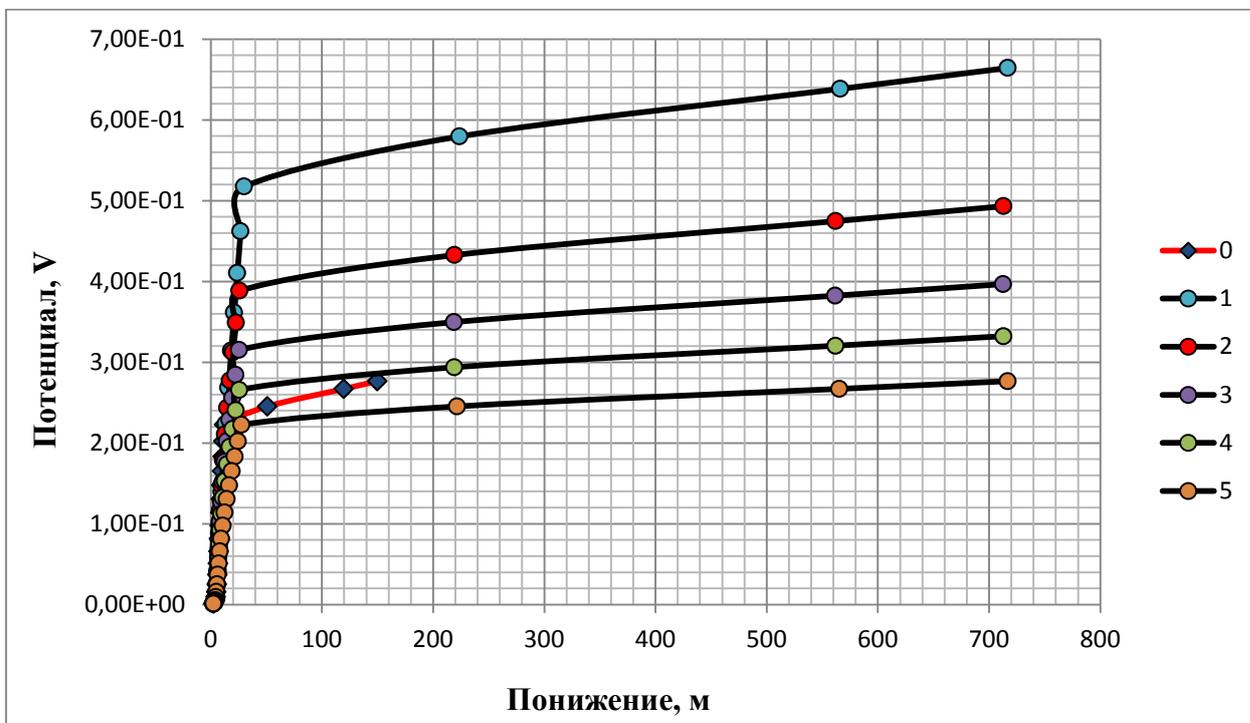


Рис. 16. Зависимость между потенциалом и понижением напора для случая металлической обсадной трубы при понижении k_f вблизи фильтра до 0,01 м/сут. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Приведенные графики демонстрируют более пологий наклон в области высоких значений потенциалов. В области низких значений, где влияние пониженного коэффициента фильтрации уже не сказывается, поведение кривых аналогично случаю, не учитывающему несовершенство скважин по характеру вскрытия водоносного горизонта (рис. 10). Исходя из этого, можно сделать вывод, что такое распределение потенциала может рассматриваться как признак кольматации фильтра.

Рассмотрение зависимостей тангенсов углов наклона кривых, представленных на рисунках 10, 15, 16, а также отношений тангенсов от коэффициента фильтрации в призабойной зоне позволяет делать выводы о степени кольматации скважины.

Введем обозначение: $tg\alpha_1$ – тангенс угла наклона кривой до излома, $tg\alpha_2$ – после излома. Сначала рассмотрим зависимость $tg\alpha_2$ от коэффициента фильтрации (рис. 17).

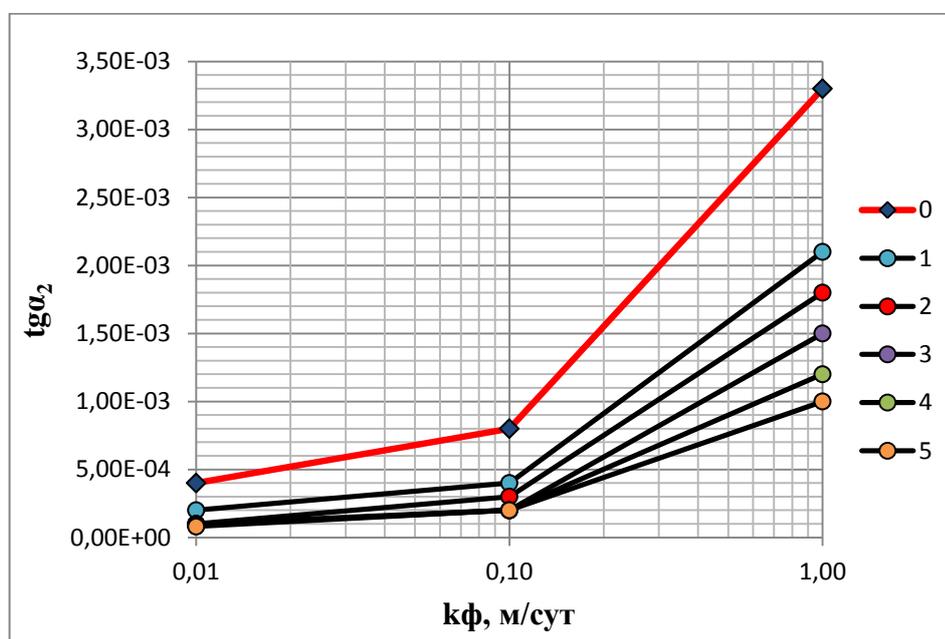


Рис. 17. Зависимости тангенсов углов наклона рассмотренных корреляционных кривых от коэффициента фильтрации в прифильтровой зоне. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Как показывают приведенные графики, при больших значениях тангенса угла наклона кольматация скважины практически отсутствует. С ростом кольматации и уменьшением коэффициента фильтрации прифильтровой зоны значение тангенса становится меньше, и это является диагностическим признаком для оценки степени кольматации фильтра скважины.

Теперь рассмотрим поведение отношения тангенсов после и до излома $tg\alpha_2/tg\alpha_1$ в зависимости от коэффициента фильтрации вблизи фильтра скважины (рис. 18).

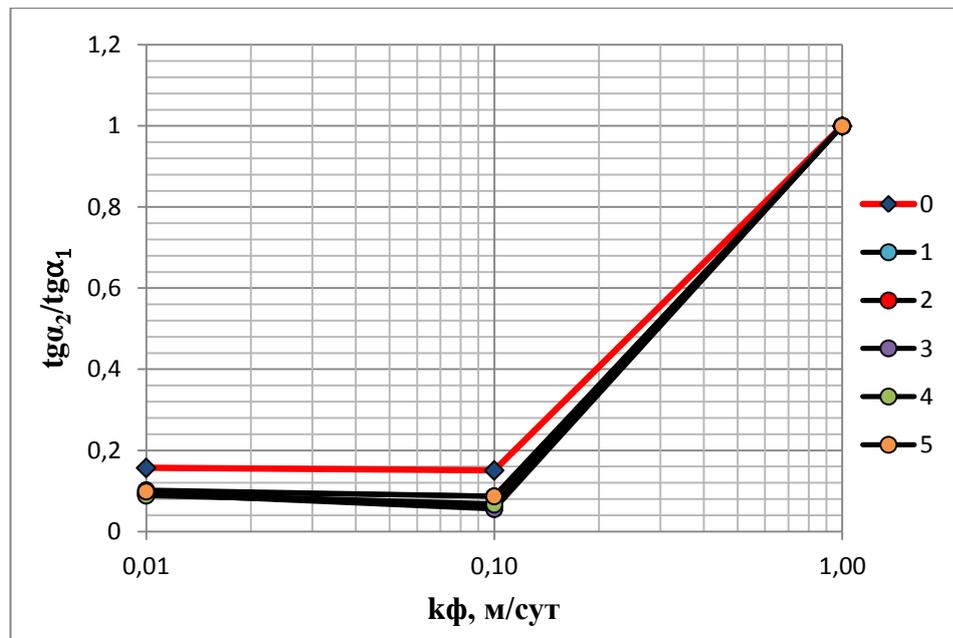


Рис. 18. Зависимости отношений тангенсов углов наклона рассмотренных корреляционных кривых от коэффициента фильтрации в прифильтровой зоне. Номера соответствуют моделям, показанным на рис. 5.

Как видно, отношения оказываются не столь выразительными. По отношению значений двух тангенсов нельзя столь же отчетливо, как по значениям $tg\alpha_2$, оценить, как изменяется степень кольматации фильтра в диапазоне коэффициента фильтрации от 0,01 до 0,1 м/сут. Таким образом, в этой ситуации несовершенство скважины по характеру вскрытия водоносного горизонта практически не сказывается.

Таким образом, рассмотрение зависимости отношений тангенсов углов наклона от значения коэффициента фильтрации является лишь грубой диагностикой степени кольматации фильтра, в то время как зависимость $tg\alpha_2$ от коэффициента фильтрации – более точный диагностический признак.

Заключение

В результате выполнения данной работы было выполнено численное моделирование распределения напоров подземных вод и сопряженных электрических полей в программе GWF&GEM. В результате были получены данные о закономерностях поведения естественного электрического поля при откачке из напорного водоносного горизонта.

По результатам моделирования были сделаны следующие выводы:

- в случае неметаллической обсадной трубы вблизи от нее ЕП не несет информации о напоре в водоносном горизонте: одному значению потенциала соответствуют различные значения понижения;
- в случае металлической обсадной трубы, зная расположение фильтра, возможно предсказать понижение напора по значениям потенциала ЕП: для каждого положения фильтра существует близкая к линейной зависимость между потенциалом и понижением;
- в случае металлической обсадной трубы может наблюдаться отклонение зависимости между потенциалом и понижением от линейной, что является признаком кольтматации фильтра скважины;
- зависимость отношения тангенсов углов наклона корреляционных кривых от коэффициента фильтрации в прифилтровой зоне является грубым диагностическим признаком степени кольтматации фильтра скважины, а зависимость тангенса угла наклона кривой после излома от коэффициента фильтрации – более точным.

Полученные фактические данные дополняют имеющуюся базу знаний о поведении естественного электрического поля, связанного с течением подземных вод. Они позволят давать более точные качественные и количественные оценки свойств горных пород, дополняя наблюдения за понижением напора наблюдениями электрического поля.

Список литературы

- Allegre K. et. all.** A 1-D modelling of streaming potential dependence on water during drainage experiment in sand [Статья] // Geophysical Journal International. - 2012
- Berube A. P.** Investigating the streaming potential phenomena using electric measurements and numerical modelling with special reference to seepage monitoring in embankment dam [Статья]. - 2004
- Boleve A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J.L., Fry J.** Preferential fluid flow pathways in embankment dams imaged by self-potential tomography [Статья] // Near Surf. Geophys. - 2009
- Darnet M., Marquis G.** Modelling streaming potential (SP) signals induced by water movement in the vadose zone [Статья] // Journal of Hydrology. - 2003
<http://geophys.geol.msu.ru/>.
- Oliveti I., Cardarell E.** 2D approach for modelling self-potential anomalies application to synthetic and real data [Статья]. - 2017
- Revil A., Florsch, N.** Determination of permeability from spectral induced polarization in granular [Статья] // Geophys. J. Int.. - 2010
- Revil A., Linde, N.** Revil A., Linde N. Chemico-electromechanical coupling in microporous media Journal of Colloid and [Статья]. - 2006
- Rizzo E. [и др.]** Self-potential signals associated with pumping tests experiments [Журнал] // Geophys. J. Res.. - 2004
- Sheffer M.R., Oldenburg O.W.** Three-dimensional modelling of streaming potential [Статья] // Geophysical Journal International. - 2007
- Sill W. R.** Self-potential modeling from primary flows [Статья] // Geophysics. - 1983
- Titov K. [и др.]** Numerical modelling of self-potential signals associated with a pumping test experiment [Статья] // Geophys. J. Int. - 2005
- Titov K., Ilyin Yu., Konosavski P., Levitski, A.** Electrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modelling [Статья] // Journal of Hydrology. - 2002
- Titov K., Konosavsky P. и Narbut M.** Pumping test in a layered aquifer: Numerical analysis of self-potential signals [Статья] // Journal of Applied Geophysics. - 2015 - стр. 188–193.
- Апლოнов С.В. и Титов К.В.** Геофизика для геологов [Книга]. - Санкт-Петербург : СПбГУ, 2012.

Коносавский К.В., Титов К.В. и Левицки А. Программа GWF&GEM.

Руководство пользователя, 2002

Мироненко В.А. Динамика подземных вод [Книга]. - Москва : Издательство Московского Государственного Университета, 2001

Семёнов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля [Книга]. - Ленинград : "Недра", 1980

Титов К.В. и Коносавский П.К. Применение естественного электрического поля при откачках из скважин [Статья] // Вестник СПбГУ. - 2014 - стр. 52-63.

Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии [Книга]. - Ленинград : "Химия", 1984