

ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КУСТОВЫХ ОТКАЧЕК ИЗ НЕСОВЕРШЕННЫХ СКВАЖИН

<https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-98-107>

УДК 556.343



Автор: Елзеркин Эммануил Носков
 Год съёмки: 1940-е
 Издательство: Центр фотографии им. братьев Люмьер
 Год издания: 2011

ЛЕХОВ М.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, mvlekhov@geol.msu.ru
 Адрес: Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия

Аннотация

Кустовые откачки из несовершенных скважин помимо корректного планирования нуждаются в приемах обработки и расчета параметров, понятных не только гидрогеологам, но и геологам смежных специальностей. Процедура обработки данных должна быть доведена до простых графических построений и формул. При этом требуется понимание обоснованности и ограничений в использовании исходных зависимостей. Анализ данных должен начинаться с осмысленной диагностики режимов откачки на опытных графиках. Разработанные в последние десятилетия аналитические решения для однородных пластов включают сложные математические функции с комплексными аргументами. Их использование требует программного обеспечения. Без обоснования применимости выбранной модели механическая компьютерная «калькуляция» откачек имеет серьезные недостатки. В статье приведены методические приемы расчета фильтрационных параметров по данным опытных откачек, которые могут быть применимы к неоднородным условиям и учитывать несовершенство и по степени, и по характеру вскрытия пласта. Приемы используют известные методы прямой линии на графиках комбинированного и площадного прослеживания понижений в полулогарифмических координатах, разработанные для совершенных скважин. Для этого в известные формулы вводится поправка ζ_{Σ} на несовершенство, анизотропию, инерционность скважин, иные факторы. Производится замена координаты наблюдательной скважины r на расчетную величину $r_p = r \exp(\zeta_{\Sigma}/2)$. Рассчитать ζ_{Σ} невозможно, за исключением случая однородного пласта. Поэтому определять r_p следует путем подбора, добиваясь совмещения опытных кривых по скважинам на графике комбинированного прослеживания. Применение метода требует реалистичного взгляда на точность полевых определений вообще и на используемую процедуру в частности. Статья иллюстрирована графиками и расчетами полевых опытов, изложение сопровождается анализом причин дефектности данных откачек.

Ключевые слова:

инженерные изыскания; опытная кустовая откачка; несовершенные скважины; водоносный горизонт; проводимость; упругая емкость; перетекание; неоднородность; расчет параметров; графоаналитические методы; поправка на несовершенство

Ссылка для цитирования:

Лехов М.В., 2018. Приемы обработки данных кустовых откачек из несовершенных скважин. Инженерная геология, Том XIII, № 4–5, с. 98–107, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-98-107>

DATA PROCESSING TECHNIQUES FOR PUMPING TESTS WITH MULTIPLE PARTIALLY PENETRATING WELLS

MIKHAIL V. LEKHOV

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, mvlekhov@geol.msu.ru

Address: Bld. 1, Leninskie gory, 119991, Moscow, Russia

Abstract

In addition to correct planning, pumping tests with partial penetrating wells, requires methods of processing and calculating parameters that are understandable not only to hydrogeologists, but also to geologists of related specialties. The data processing procedure should be brought to simple plotting and formulas. This requires an understanding of the validity and limitations in the use of the original expressions. Data analysis should begin with a meaningful diagnosis of pumping modes on experimental plots. Developed in the last decades, analytical solutions are applicable to homogeneous aquifers and include complex mathematical functions with complex arguments. Their use requires software. Without justification of the applicability of the chosen model, the mechanical computer "calculation" of pumping has serious drawbacks. The article presents methods for calculating hydraulic parameters from experimental pumping data that can be applied to non-homogeneous conditions and take into account both degree of partial penetration and near-well destruction. The techniques use the known methods of a straight line on the graphs of combined and area tracing drawdown in semi-logarithmic coordinates, developed for fully penetrating wells. To do this, the well-known formulas introduce a correction ζ_s for degree of partial penetration, anisotropy, inertia of the wells, and other factors. The coordinate of the observation well r is replaced by the rated value $r_p = r \cdot \exp(\zeta_s/2)$. It is impossible to calculate ζ_s except for the case of a homogeneous aquifer. Therefore, it is necessary to determine r_p by selection, seeking to combine the experimental well curves on the combined tracking plot. The application of the method requires a realistic view of the accuracy of the field test in general and the procedure used in particular. The article is illustrated by plots and calculations of real field tests, the presentation is accompanied by an analysis of the causes of defectiveness of pumping data.

Key words:

engineering survey; multi-well pumping tests; partially penetrating wells; aquifer; transmissivity; storativity; leakage; non-homogeneity; calculation of parameters; graph-analytical methods; correction for partially penetration

For citation:

Lekhov M.V., 2018. Data processing techniques for pumping tests with multiple partially penetrating wells. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 4–5, pp. 98–107, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-98-107>

Введение

Откачки из несовершенных скважин — вид полевых опытов, с которыми изыскатель обычно имеет дело, причем в самых разнообразных условиях. Такие откачки заслуживают большего внимания, чем уделяют им методические руководства 60–70 годов, по-прежнему используемые изыскателями. Статья в некотором роде имеет характер учебного пособия, содержит замечания, касающиеся практики полевого опробования, анализ режима откачки, исходные зависимости, порядок подготовки данных и формулы расчета параметров. Приведены примеры с описанием последовательности обработки данных и проверкой корректности расчетов.

Методы интерпретации откачек основаны на аналитических решениях дифференциального уравнения фильтрации [1, 3, 6]. Моделирование, к сожалению, используется редко. Оно требует программного обеспечения и подготовки исполнителя. Но возможности решения обратной задачи моделирования намного шире. Модель в профильной постановке позволяет учесть неоднородность, кольматацию скважин, переменный дебит и другие факторы [5].

Предпосылкой аналитических методов является однородное строение пласта. Наиболее полные аналитические

решения получены для двухмерной в разрезе задачи, в общем случае в анизотропном пласте. Теория применима и к наливам в скважины.

Востребованные в практике изысканий приемы используют эталонные решения для упругого, реже гравитационного режимов откачки. Более всех популярен метод прямой линии Джейкоба [2]. К сожалению, его часто используют бездумно, без проверки ограничений. Как следствие, расчеты дают существенно искаженные параметры.

Существуют решения для слоистого строения пласта, для потока, ограниченного водоемом, для горизонта с плановой неоднородностью. Для таких схем трудно сформулировать понятные критерии их применения. Обработку делают, исходя из субъективных предположений.

Схематизация первого от поверхности водоносного горизонта (чаще других участвующего в изысканиях) для учета осложнений ограничивается влиянием фактора перетекания или водоотдачи со свободной поверхности. Однако совместное их действие может привести к реакции скважин, обработка которой обычными приемами невозможна или нуждается в изначально большем количестве наблюдательных скважин и длительности с ненарушен-

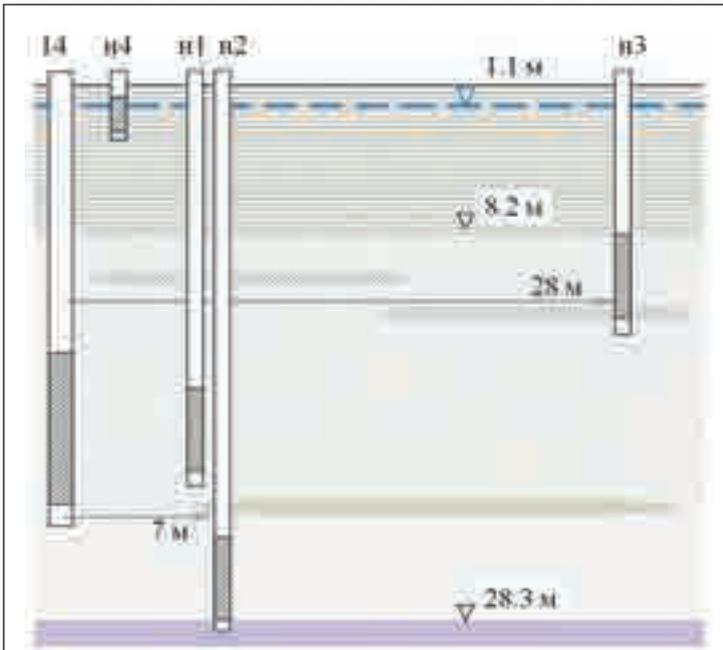


Рис. 1. Скважины куста 14 в аллювиальном водоносном горизонте (пример «малого куста»)

Fig. 1. The wells of the cluster 14 in the alluvial aquifer (an example of «petit cluster» equipment)

ным дебитом и, главное, естественным режимом. Последнее условие выполняется в единичных случаях.

Для опытов с заданным дебитом количество решений может быть названо даже избыточным. Но их большая часть не находит применения из-за неопределенности в доказательстве адекватности выбора схемы гидрогеологическим условиям. Кроме того, следует реально смотреть на профессиональную подготовку изыскателя, обычно весьма скромную, если он не занят научной работой. Практика обработки данных откачек не может быть названа удовлетворительной по нескольким причинам.

Параметры функций автоматических решений связаны в комплексный аргумент. Отсюда — неоднозначность расчета каждого из них. Ее усиливают неоднородность проницаемости, анизотропии и упругоэластичности в разрезе. В горизонтах, мощность которых превышает длину фильтра скважины, неоднородность имеет место всегда. И практически всегда она приводит к отклонению опытных данных от «чистого» решения.

Существуют причины технические. Кольматаж скважин, нарушение пород в процессе бурения являются решающими причинами дефектности одиночных откачек и данных по центральным скважинам кустов. Осушение фильтра с образованием участка высачивания, осложненное кольматажем, влияние емкости ствола могут сказаться на реакции не только опытной, но и ближних наблюдательных скважин.

Наблюдательные скважины также могут иметь инерционность. Из-за сопротивления фильтра их реакция запаздывает по сравнению с пластом. В результате расчеты дают завышенную упругую емкость и заниженную проницаемость.

Распространенный источник ошибок расчетов — несоответствие глубин фильтра планируемыми значениям из-за небрежности бурения. Аномальная реакция скважины получается, например, при переуглублении забоя

скважины, предназначенной для наблюдений в покровном слое. Искажение может являться следствием неаккуратной обсыпки не только фильтрового интервала, но и отстойника и затрубья над фильтром. Заданный интервал откачки или наблюдений может быть «смазан», завышен перетоком воды по внешней стенке труб над фильтром. И, наконец, просто может быть неизвестен разрез — положение водоупора, прослоев и т.д.

Изыскатель все меньше задумывается о соответствии реальных условий идеальным схемам, усвоенным из справочников. При слоистой неоднородности учет несовершенства сводится не только к заданию интервала фильтра в разрезе. Отсюда ошибки в расчетах, непонимание необходимости кустовых опытов. В изысканиях до сих пор преобладают одиночные откачки. Их обработка производится некорректно, в массе они дают существенно заниженную проницаемость.

Препятствием использованию аналитических моделей является невозможность табулировать специальные функции. Необходима покупка программы. Обоснование фильтрационной схемы также требует квалифицированного анализа строения и диагностики опытных данных. Влияние же неоднородности может и вовсе не позволить воспользоваться каким-либо каноническим решением. Обычным выходом, к которому прибегает нерадивый исполнитель, служит перебор библиотечных программ, — какая подойдет.

Математическое обеспечение исследований (не только фильтрационных), к сожалению, сопровождается все большим формализмом в отношении анализа данных. Программное обеспечение изысканий стремится охватить все методы, забывая о том, что разнообразие может поставить изыскателя в тупик. Не имея научного интереса, он вряд ли имеет возможность разобраться, в чем отличие одной расчетной схемы от другой. Неизбежно возникает потребность в понятной процедуре обработки данных без обращения к коммерческим программным продуктам.

В статье показано, как данные откачек могут быть успешно обработаны с использованием простых графиков, знакомых из методов для совершенных скважин. Достаточно использовать электронную таблицу с простейшими вычислениями содержимого ячеек. Достоинство метода состоит в том, что он применим для скважины, несовершенной и по степени, и по характеру вскрытия пласта, а также с учетом его неоднородного строения и анизотропии.

Режим откачки и расчетные параметры в инженерных изысканиях

При откачке с дебитом Q из несовершенной скважины приток к скважине может быть описан уравнением [1, 2], учитывающим особенности фильтрационной схемы

$$s = \frac{Q}{4\pi T} s_D, \quad (1)$$

где s — понижение напора или уровня воды в скважине, Q — дебит, $\text{м}^3/\text{сут}$, T — проницаемость пласта, $\text{м}^2/\text{сут}$, s_D — функция безразмерного понижения.

В простейшем случае совершенной скважины в напорном пласте s_D — интегральный экспоненциал, известный гидрогеологу как функция Тейса. Для описания притока в реальных условиях ее аргументами служит весь весьма

длинный ряд параметров пласта и характеристик скважин, о которых пойдет речь ниже.

Проводимость представляет собой интегральную характеристику $T = \int k(z) dz$, коэффициент фильтрации $k(z)$ является переменной по вертикальной координате z характеристикой пород.

В известных аналитических зависимостях вида (1) и методах расчета участвует проводимость T как первичный параметр и результат обработки. Несмотря на это, результатом изысканий считается средний по мощности m коэффициент фильтрации, не имеющий физического смысла (примерно так же, как и средняя температура). Для общей характеристики напорного или субнапорного водоносного горизонта эта величина, возможно, удобна. Но использовать $k_{cp} = T/m$ в прогнозных расчетах неправильно. В задаче водопонижения или значительного подпора ошибки таких расчетов оборачиваются промахами в проектировании.

Изыскания в строительном проектировании направлены в основном на определение коэффициента фильтрации k и проводимости T водоносных горизонтов¹. В случае взаимосвязи гидравлически разобренных пластов — коэффициента перетока χ разделяющих горизонтов. Упругая емкость S (в отечественной литературе μ^*) определяется попутно, служит для оценки корректности расчетов и почти не используется в строительной гидрогеологии.

Гравитационная емкость, или водоотдача, S_y (в отечественной литературе μ) нужна в нестационарных задачах. Ее определение требует длительных откачек, что всегда осложнено отключением насоса или естественным колебанием уровня. Но главное, — практически всегда на вторые–третьи сутки, особенно в городе, вблизи рек режим оказывается нарушенным работой дренажных и гидротехнических сооружений. Часто сказывается влияние сброса самой откачиваемой воды вблизи куста.

С осложнениями режима связана крайне редкая возможность успешного применения решений для периода работы гравитационной емкости потока при откачке, включая схемы, основанные на теории влагопереноса.

В задачах с большим водопонижением использование гравитационной водоотдачи, полученной откачкой, не имеет смысла. В ходе осушения пласта параметр будет меняться в зависимости от свойств пород. Поэтому прежде чем возлагать на изыскателя задачу определения гравитационной емкости, следует учесть это обстоятельство, и не требовать бесполезных длительных откачек. С другой стороны, этот параметр все же необходим для проекта. Выход следует искать в разработке специальных, возможно лабораторных, методов, использовании корреляционных зависимостей.

Опыт инженерных изысканий показывает, что успешными получаются откачки длительностью до одних суток. В течение этого времени вначале проявляется период I режима краткосрочной консолидации (упругой емкости) в ходе снижения порового давления. На графиках временного прослеживания понижений в этот период выделяют прямолинейный участок для расчета методом Джейкоба (рис. 2), часто забывая проверить корректность его применения.

Весьма быстро, через десятки минут после пуска, редко часы, график в координатах $s - \lg t$ отгибается от пря-

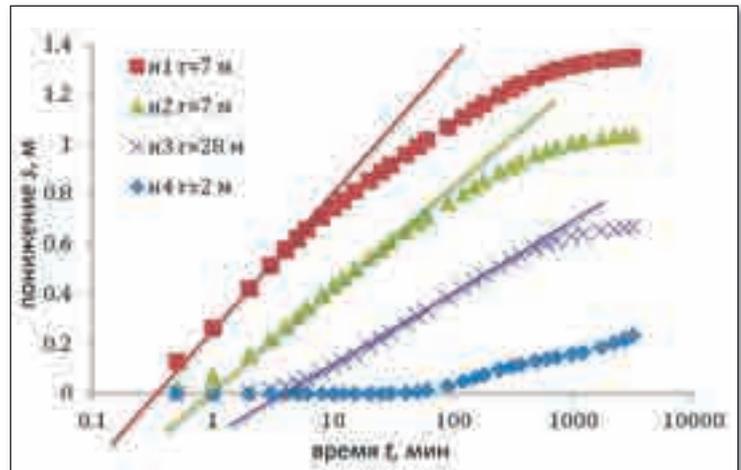


Рис. 2. Графики хода понижений s от времени t в скважинах куста 14 (см. рис. 1): r — расстояние до наблюдательной скважины. Разный наклон расчетных прямых — типичная ошибка при обработке данных

Fig. 2. The time-drawdown plot for the wells of the cluster 14 (fig. 1): r — distance to the observation well. The different slope of the design lines — a typical error in data processing

мой (см. рис. 2). Возникает перетекание из соседнего горизонта, компенсирующее понижения напоров. В безнапорном пласте (со слабопроницаемым покровным слоем или без него) стабилизация обусловлена перетеканием со свободной поверхности и продолжается до тех пор, пока не начнется ее активное снижение. В связи с этим период II называется ложностационарным, а стабилизация — ложной.

Главной особенностью I и II периодов откачки является активное понижение напоров и уровней воды в скважинах при незначительных понижениях свободной поверхности. На рис. 2 график по скважине n4 показывает небольшие понижения свободной поверхности даже в непосредственной близости от центральной.

В безнапорном пласте периоды I и II протекают без снижения свободной поверхности, мощность потока не меняется. Типичная ошибка изыскателей — использовать в период упругого режима вместо понижений s функцию $s_n = s(1-2s/h)$, h — мощность (глубина) потока. Функция предложена Джейкобом в 1944 г. [2] для совершенной скважины. В окрестности несовершенной скважины предпосылка Дюпюи, на которой основано использование s_n , нарушена, особенно в неоднородном пласте. Прием допустим только для однородного потока, когда понижения свободной поверхности превышают $0,1h$ (в изысканиях часто неизвестен водоупор, и определить h нельзя).

В горизонтах с маломощным потоком период II может быть скоротечным, а период I не проявляется. Хотя такие случаи встречаются реже, но методика их проведения и обработки заслуживает отдельного рассмотрения, включая случаи налива в сухую скважину над водоупором.

Период III гравитационного режима уверенно проявляется в откачках значительной длительности, для расчетов требуются трое и более суток. Они редко бывают успешными. В статье период III не рассматривается. Не

¹ Виды опытно-фильтрационных работ, требования к их организации и проведению содержатся в ГОСТ 23278-2014 «Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости», составленном под руководством автора.

рассматриваются также откачки, имеющие целью определение сопротивления ложа водотоков, требующие значительной длительности. Они крайне редко получают. Это не значит, что такие опыты не следует делать и совершенствовать их методику.

Уравнения для понижения напора s при откачке

Безразмерное понижение в уравнении (1) может быть представлено в виде функции Тейса, в более общем случае — функции Хантуша [1, 2] W для совершенной скважины с поправкой ζ_Σ на отклонение от идеальной схемы

$$s_D = W\left(\frac{r^2}{a^*t}, \frac{r}{B}\right) + \zeta_\Sigma(t), \quad a^* = \frac{T}{S}, \quad B = \sqrt{\frac{T}{\chi}}, \quad \zeta_\Sigma = \sum_i \zeta_i, \quad (2)$$

где t — время, r — радиальная координата, a^* — коэффициент пьезопроводности, B — параметр перетекания, χ — коэффициент перетока.

Величина χ представляет собой условное отношение коэффициента вертикальной фильтрации к мощности $\chi = k_v/m_0$, для безнапорного потока — отношение коэффициента вертикальной фильтрации к одной третьей мощности h_0 потока $\chi = 3k_z/h_0$ [6].

Функция ζ_Σ определяет разницу между влиянием не совершенной скважины в реальном неоднородном пласте и скважины совершенной, в напорном пласте. Другими словами, ζ_Σ — суммарное дополнительное сопротивление, поправка, с помощью которой осесимметричный профильный двухмерный поток может быть приведен к одномерному в плане. Формула (2) безразмерного понижения s_D применима для всех случаев откачки с постоянным дебитом и даже для откачек с линейной связью между дебитом и динамическим уровнем.

Под простой формой уравнений (1) и (2) скрываются зависимости, в которых в качестве аргументов функций ζ_i участвуют время, координаты, характеристики скважин (длина и положение фильтров), анизотропии, неоднородности, перетекания, кольматажа. Сюда же могут быть включены промахи в оборудовании скважин.

Для однородного пласта известно [3, 4, 6–11] использование одной из функций — поправки на несовершенство скважины по степени вскрытия пласта ζ (переменной в начальный период откачки [1, 2, 8])

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[W\left(\frac{r^2}{a^*t}\right) + \zeta \right]. \quad (3)$$

К такому же виду может быть приведено уравнение, учитывающее влияние емкости ствола в начальный период откачки, причем не только в самой опытной, но и в ближних наблюдательных скважинах. К поправке ζ можно добавить поправку ζ_Q на переменный, нарастающий характер притока к фильтру скважины при постоянном дебите на устье.

Для реального строения водоносных горизонтов не представляется возможным отыскать значения ζ_Σ , если ставить задачу детерминированного решения дифференциального уравнения фильтрации. Но в способе, рассматриваемом ниже, этого можно избежать, используя процедуру подбора. Требуется понимание ожидаемого результата и погрешностей, которые, как и в любом методе, зависят от соблюдения ограничений применимости зависимостей.

При наступлении квазистационарного режима уравнение (1) может быть представлено в виде, который позво-

ляет использовать для обработки данных график комбинированного прослеживания в координатах $s - \lg(t/r_p^2)$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,25a^*t}{r_p^2}, \quad (4)$$

Логарифмическая аппроксимация (4) с погрешностью 5% [6] справедлива при условии

$$\frac{t}{r_p^2} > \frac{3}{a^*}. \quad (5)$$

В период ложной стабилизации уравнение (1) также имеет логарифмическую аппроксимацию, позволяющую использовать для обработки график в координатах $s - \lg(r_p)$

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{1,12B}{r_p}. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо [6] в зоне, радиус которой ограничен условием

$$r < (0,2 - 0,3)B. \quad (7)$$

Расчетная величина r_p для опытной (центральной) скважины известна как расчетный радиус [1]. Для наблюдательной скважины назовем r_p расчетным расстоянием [4, 6]

$$r_p = \exp\left(-\frac{\zeta_\Sigma}{2}\right). \quad (8)$$

Критерии (5) и (7) оперируют значениями радиальной координаты r . Аппроксимации (4) и (6) справедливы при условии $\zeta_\Sigma = \text{const}$ в определении величины r_p (8). На удалении от центральной скважины более мощности потока разница между расчетным расстоянием и радиальной координатой наблюдательной скважины становится несущественной $r_p \approx r$.

Метод расчета для несовершенных скважин, используя зависимости (6)–(8), был предложен автором в дипломной работе в 1974 году. Расчет аналогичен методу с использованием полулогарифмического графика в координатах $s - \lg(r_p)$ для откачек из совершенной скважины. Вместе с приемами расчета поправок метод опубликован в совместной с научным руководителем В.М. Шестаковым статье [6]. Существуют также формулы и таблицы значений ζ для однородного пласта [7, 10, 11], пользование которыми весьма затруднительно. Поэтому автор на основе метода отражений стоков Ю.О. Зеегофера и В.М. Шестакова [3] разработал простую библиотечную программу расчета ζ , открытый код которой опубликован в статье [4].

Расчетные графики и формулы

Для откачки в однородном анизотропном пласте, когда действует только поправка на несовершенство скважин по степени вскрытия пласта, значения ζ и r_p можно определить по формулам и таблицам [3, 4]. В общем случае неоднородного строения пласта и инерционности скважин расчетные значения r_p можно определить только подбором.

Опытные точки квазистационарного периода на полулогарифмическом графике аппроксимируют прямой, по наклону которой рассчитываются параметры (рис. 4). То же делают с данными на период стабилизации (рис. 5). Аппроксимация опытных графиков должна удовлетворять критериям (5) и (7).

По графику $s - \lg(t/r_p^2)$ (см. рис. 4) расчет параметров производится по формулам

$$T = \frac{Q}{4\pi(s_2 - s_1)} \ln \left(\frac{(t/r_p^2)_2}{(t/r_p^2)_1} \right), \quad (9)$$

$$a^* = \frac{1}{2,25(t/r_p^2)_0}, \quad S = \frac{T}{a^*}. \quad (10)$$

По графику $s - \lg(r_p)$ (см. рис. 5) параметры рассчитываются по формулам

$$T = \frac{Q}{2\pi(s_1 - s_2)} \ln \left(\frac{(r_p)_2}{(r_p)_1} \right), \quad (11)$$

$$B = \frac{(r_p)_0}{1,12}, \quad \chi = \frac{T}{B^2}, \quad (12)$$

В формулах (9)–(11) индексы 1 и 2 указывают значения координат точек, выбираемых на прямой линии, индекс 0 — значение абсциссы в точке пересечения прямой линией $s = 0$.

Определение значений расчетных расстояний r_p

Ответственной задачей изысканий является планирование опытных кустов. Учитывая всегда ограниченные размеры участка работ и проблемы с заданием достаточного дебита откачки, рациональным представляется размещение наблюдательных скважин таким образом, чтобы наиболее удаленная находилась на расстоянии, превышающем мощность потока. В этой области дополнительное сопротивление можно не учитывать. С другой стороны, понижения на удалении могут оказаться небольшими, и скважины будут потерянны для расчетов. Кроме того, на большом расстоянии, в большинстве случаев не соблюдаются ограничения (5) и (7). Поэтому дальняя скважина должна быть отнесена на расстояние полутора, в крайнем случае, двух мощностей потока. Рекомендации оптимальны в практике инженерных изысканий для строительства. В разведке водозаборов они должны быть другими.

Для использования зависимостей (9) — (12) необходимо построение совмещенных по скважинам графиков $s - \lg(t/r_p^2)$. Величины r_p подбираются до совмещения кривых с выходом на единую прямую (см. рис. 4), которая может затем разветвляться, как и должно быть в схеме с перетеканием.

Для ускорения процедуры используется электронная таблица. Для каждой скважины запись t/r_p^2 в ячейки производится в формульном виде, как это сделано в приведенной таблице.

Формулы в столбцах С и Е ссылаются на значения времени t , внесенные в фиксированный (знак \$) для всех скважин столбец А, и на значение r_p , которое введено в ячейках строки 2, фиксированной для всех t . Ячейки со значениями r_p показаны цветом. Перебор значений r_p производится вручную и сопровождается автоматическим пересчетом значений t/r_p^2 и перестроением по этой координате графика понижения s .

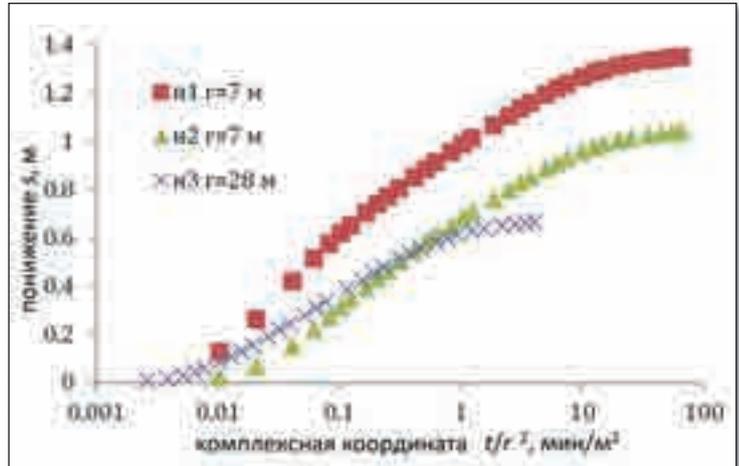


Рис. 3. График комбинированного прослеживания понижений s в скважинах куста 14 без учета несовершенства: t — время, r — расстояние до наблюдательной скважины

Fig. 3. Time-distance-drawdown plot for the well cluster 14 without taking into account partially penetration: s — drawdown, t — time, r — distance to the observation well

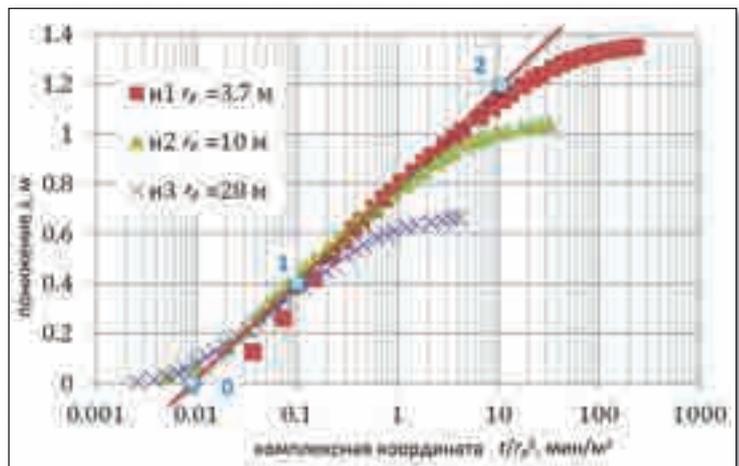


Рис. 4. Совмещенные кривые графика на рис. 3 с учетом несовершенства подбором значений r_p : s — понижение, t — время, r_p — расчетное расстояние (8). Точки 0, 1 и 2 участвуют в расчетах

Fig. 4. The shifted graphics shown in Fig. 3 with taking into account partially penetration by matching the values of r_p : s — drawdown, t — time, r_p — rate distance (8). Points 0, 1 and 2 are involved in calculations

Опорным в процедуре подбора является график понижений в дальней скважине (н3 на рис. 3 и 4), для которой справедливо условие $r_p = r$. Ее опытная кривая не меняет своего положения и является ограничением справа для перемещения других кривых.

Реакция ближней скважины в начале откачки может запаздывать из-за переменного расхода, обусловленного влиянием емкости ствола центральной. Иллюстрацией служит график скважины н1 на рис. 4.

Примеры обработки откачек

Откачка из скв. 14 с дебитом 9,8 л/с производится из скважины диаметром 273 мм, опробуется пласт аллювиальных песков. Разрез в нижней части представлен крупнозернистыми песками с галькой, в средней — среднезернистыми песками с линзами глин. Покровный слой

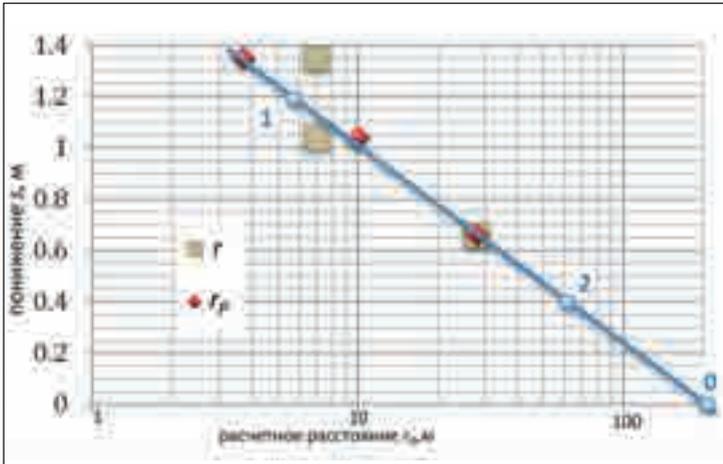


Рис. 5. Зависимость понижения s от расчетного расстояния r_p для периода стабилизации в скважинах куста 14. Точки 0, 1 и 2 участвуют в расчетах

Fig. 5. Dependence of the drawdown s from the calculated distance r_p for the period of stabilization in the well cluster 14. Points 0, 1 and 2 are involved in the calculations

представлен легкими суглинками. Горизонт субнапорный, свободная и пьезометрическая поверхности устанавливаются на глубине около одного метра.

Куст (схема на рис. 1) спланирован таким образом, чтобы кроме обработки аналитическими методами можно было оценить параметры слоев с использованием численного моделирования (программа 1WELL [5]). В инженерных изысканиях четыре–пять наблюдательных скважин достаточно для определения суммарной проводимости и перетекания [2]. Такие опыты продолжительностью до трех суток могут быть названы для краткости «малыми кустами»².

Анализ режима откачки производится по графикам временного прослеживания понижений, который во многих случаях удобно строить, используя метод скользящего среднего, как это сделано на рис. 2. Расчет по наклону прямой на графике $s-\lg t$ по каждой скважине отдельно всегда дает разные значения, особенно в неоднородном

Таблица
Table

Форма записи понижений s , расчетных расстояний r_p и формул расчета t/r_p^2 в электронной таблице
The form of the record drawdowns s , the calculated distances r_p and formulas for calculating t/r_p^2 in the spreadsheet

	А	В	С	Д	Е
1.		Скважина n1		Скважина n2	
2.	Время	r_p [м] = 1,7		r_p [м] = 10,0	
3.	С, мин	с, м	t/r_p^2 , мин/м ²	с, м	t/r_p^2 , мин/м ²
4.	0	0	0	0	0
11.	12	0,77	=SA11 / CS1^2	0,47	=SA11 / ES1^2
12.	15	0,81	=SA12 / CS1^2	0,51	=SA12 / ES1^2

анизотропном пласте (см. рис. 2). Причиной является осложнение переменным характером ζ_{Σ} (2) на выходе на квазистационарный режим.

Последовательность обработки данных

1. На графике комбинированного прослеживания (см. рис. 3) следует построить кривые понижений для каждой наблюдательной скважины, используя для расчета t/r^2 в качестве начального приближения радиальную координату скважины r .
2. Путем перебора (пересчета) нескольких значений r_p в таблице следует добиться совмещения кривых, как это показано на рис. 4 с графиком $s-\lg(t/r_p^2)$. Положение кривой по скважине, расстояние до которой больше мощности пласта (скважина n3), не меняется. Кривые по ближним скважинам должны быть на начальных участках наложены на нее.

Для ближних скважин осложнением для линейной аппроксимации совмещенных кривых может стать влияние емкости центральной скважины (скважина n1), для дальних – расположение скважины за радиусом достижения квазистационарного режима (скважина n3), а также перетекание, которое может проявиться раньше выхода на прямую линию.

3. По наклону прямой производится расчет параметров (9) и (10), используя координаты точек на рис. 4

$$T = \frac{9,8 \times 86,4 \times 2,3}{4\pi(1,18 - 0)} \lg \frac{10}{0,01} = 394 \frac{\text{м}^2}{\text{сут}}$$

$$a^* = \frac{1440}{2,25 \times 0,01} = 6,4 \times 10^4 \frac{\text{м}^2}{\text{сут}} \quad (13)$$

$$S = \frac{394}{6,4 \times 10^4} = 6,2 \times 10^{-3}$$

4. В процедуре обработки данных обязательна проверка критерия квазистационарности — значения $(t/r_p^2)_{кв}$, начиная с которого допустима прямолинейная аппроксимация. Подстановка значения a^* в формулу (5) показывает, что величина $(t/r_p^2)_{кв} = 1440 \cdot 3 / 6,4 \cdot 10^4 = 0,07 \text{ мин/м}^2$ и расчет является верным (см. рис. 4).
5. Используя подобранные совмещением графиков значения r_p , может быть построен график прослеживания понижений на период стабилизации по координате расчетного расстояния (см. рис. 5). Расчеты производятся по формулам (11) и (12)

$$T = \frac{9,8 \times 86,4 \times 2,3}{2\pi(1,2 - 0,4)} \lg \frac{60}{6} = 388 \frac{\text{м}^2}{\text{сут}}$$

$$B = \frac{190}{1,12} = 170 \text{ м.} \quad (14)$$

$$\chi = \frac{388}{170^2} = 0,013 \text{ сут}^{-1}, \quad k_0 = m_0 \chi = 0,09 \frac{\text{м}}{\text{сут}}$$

Расчет с использованием прямой линии на графике $s-\lg(t/r_p^2)$ правомочен, так как удаление r самой дальней скважины n3 удовлетворяет условию (7): $28 \text{ м} < 0,2 \cdot 170 \text{ м}$.

Откачка из скважины 300 предназначена для опробования аллювиального водоносного горизонта (рис. 6). Го-

² Малобюджетные инженерные изыскания не ставят задачу определения полного набора параметров, требуется оценка лишь суммарной проводимости и перетекания. Для таких случаев в Своде правил «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» (Минстрой России, 2018 г.) автором предложены «малые кусты» — кустовые откачки длительностью первые сутки с тремя–четырьмя наблюдательными скважинами.

ризонт сложен песками: сверху мелкозернистыми, в интервале 8–10,4 м среднезернистыми с гравием, в нижней части — пылеватыми с линзами глин. Пески перекрыты рыхлой насыпью. Горизонт подстилается глинами. Поток безнапорный, мощность от водоупора до свободной поверхности 11 м. Фильтр центральной скважины диаметром 219 мм установлен в нижнюю часть пласта. Фильтры наблюдательных скважин 301, 302, 303 установлены в наиболее проницаемую часть разреза. Скважина 304 предназначена для подтверждения стабилизации за счет перетекания со свободной поверхности без заметного ее снижения. Все скважины имеют обсыпку фильтрового интервала.

Откачка производилась с дебитом 5,3 л/с. Через 18 часов динамический уровень в скважине опустился до насоса, и дебит стал падать. Обработка проведена по неискраженному периоду. На графиках понижений (рис. 7, 8) видны характерные участки упругого режима и ложной стабилизации. В скважинах n1 и n2 помимо начального прямолинейного участка проявляется еще один — вслед за первым. Такая реакция обусловлена влиянием постепенного нарастания перетекания, реализуемого, возможно, за счет упругой емкости подстилающей глинистой толщи. Подтвердить предположение могли бы наблюдательные скважины с фильтрами, установленными в ней.

Сопоставление графиков на рис. 7 и 8 иллюстрирует совмещение кривых по скважинам. Путем подбора расчетных расстояний r_p кривые по скважинам 301 и 302 «пододвинуты» к кривой по скважине 303 так, что получился единый для всех прямолинейный участок. По наклону прямой получены параметры: проводимость $T = 195 \text{ м}^2/\text{сут}$, пьезопроводность $a^* = 2,9 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$, упругая емкость $S = 6,7 \cdot 10^{-4}$.

Полученные подбором расчетные расстояния позволили построить график $s\text{--}lgr_p$ (рис. 9) и определить проводимость $T = 198 \text{ м}^2/\text{сут}$, параметр перетекания $B = 160 \text{ м}$ и коэффициент (внутрипластового) перетока $\chi = 0,008 \text{ л/сут}$.

Для каждого из рассмотренных кустов расчеты проводимости двумя способами дали одинаковые значения. Графики $s\text{--}lgr_p$ на рис. 5 и 9 подтверждают возможность интуитивного подбора расчетного расстояния r_p для учета осложнений в откачках из несовершенных кольматированных скважин в неоднородных анизотропных пластах. В случае с совершенной скважиной, безусловно, обработка была бы намного более простой.

Откачки на кустах 14 и 300 были воспроизведены на численной модели профильно-радиальной фильтрации в окрестности несовершенной скважины в программе 1WELL [5]. Решение обратной задачи показало весьма близкие значения параметров, полученных на модели и с помощью описанной методики.

Заключение

Реальные условия проведения откачек существенно отличаются от идеальных схем. Методы, основанные на аналитических решениях (полученных в предпосылке однородной среды и при этом весьма сложных) для скважины, фильтр которой вскрывает тот или иной слой разной проницаемости, могут быть использованы весьма условно. Множественное влияние факторов, к которым помимо неполного вскрытия пласта, можно добавить инерционность за счет нарушения прискважинной зоны, неизбежно приводит к неоднозначному и часто ошибочному результату.

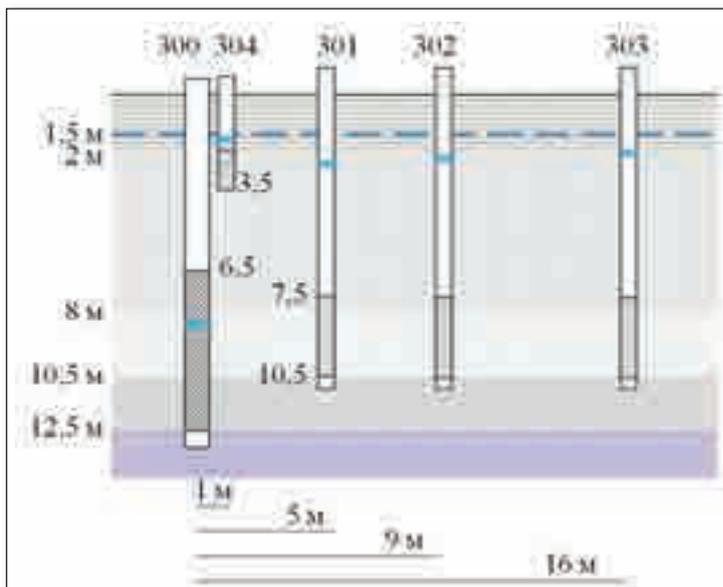


Рис. 6. Разрез аллювиального водоносного горизонта со схемой расположения скважин куста 300 (пример «малого куста»). В скважинах показаны уровни воды в конце откачки

Fig. 6. A cross-section of the alluvial aquifer with the layout of the well cluster 300 (an example of a «petit cluster»). The water levels are shown in the wells at the end of the pumping

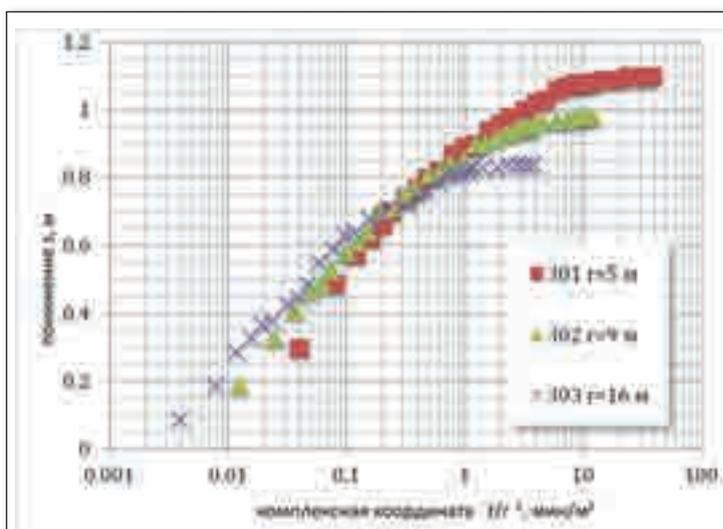


Рис. 7. График комбинированного прослеживания понижений s в скважинах куста 300 без учета несовершенства: t — время, r — расстояние до наблюдательной скважины

Fig. 7. Time-distance-drawdown plot for the well cluster 300 without taking into account partially penetration: s — drawdown, t — time, r — distance to the observation well

Изложенная в статье методика решает более скромную задачу — определение суммарной проводимости и перетекания, но с учетом того, что на несовершенство скважины влияет не только геометрия и анизотропия, но и слоистая неоднородность, а также кольматация фильтра. Предварительное вычисление самой характеристики такого суммарного несовершенства не требуется.

Используются известные решения и графоаналитические методы обработки откачек из совершенных скважин в напорных пластах, изолированных и с перетеканием, которые справедливы также для режима упругой филь-

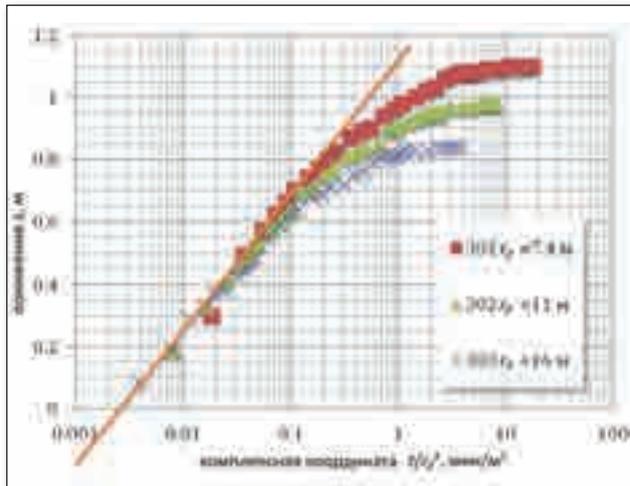


Рис. 8. Совмещенные кривые графика на рис. 7 с учетом несовершенства подбором значений r_p . S — понижение, t — время, r_p — расчетное расстояние (8)

Fig. 8. The shifted graphics shown in Fig. 7 with taking into account partially penetration by matching the values of r_p . s — drawdown, t — time, r_p — calculated distance (8)

рации и ложной стабилизации напоров и в безнапорных и субнапорных горизонтах.

В уравнение связи понижения с дебитом (2) вводится поправка ζ_s , которая является суммой сопротивлений, характеризующих отклонение реакции пласта от канонического решения. Обработка производится при условии стабилизации величин таких дополнительных сопротивлений. Для расчета используются логарифмическая аппроксимация квазистационарного и ложностационарного режима. Величина поправки учитывается

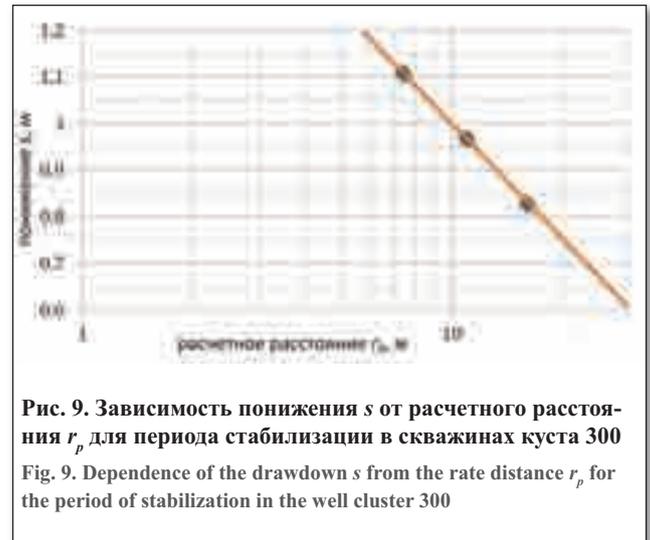


Рис. 9. Зависимость понижения s от расчетного расстояния r_p для периода стабилизации в скважинах куста 300

Fig. 9. Dependence of the drawdown s from the rate distance r_p for the period of stabilization in the well cluster 300

путем замены радиальной координаты r на расчетную величину r_p (8), которую определяют подбором путем совмещения опытных кривых комбинированного прослеживания.

Расчеты, которые могут быть произведены таким способом, не свободны от ошибок, как и все методы гидрогеологических исследований, поскольку опытные данные всегда являются неполными в отношении знания природных условий и зависят от технических погрешностей их получения. Тем не менее изложенный метод является вполне корректным с математической точки зрения. Главным условием для его использования и доверия к полученному результату является соблюдение ограничений применения зависимостей. И конечно, необходим определенный опыт в производстве откачек и их интерпретации. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М., 1969. Основы гидрогеологических расчетов. Недра, Москва.
2. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С., 1971. Физико-математические основы фильтрации воды. Мир, Москва.
3. Зеогофер Ю.О., Шестаков В.М., 1972. Вопросы методики расчета несовершенных скважин. Труды Ташкентского государственного университета, Вып. 424, с. 51–62.
4. Лехов М.В., 2002. Расчет поправки на несовершенство скважины при откачке в пласте ограниченной мощности. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, № 3, с. 266–274.
5. Лехов М.В., 2015. Профильное моделирование скважин в безнапорном водоносном горизонте. Программа 1WELL. Инженерная геология, № 3, с. 52–64.
6. Шестаков В.М., Башкатов Д.Н. (ред.), 1974. Опыт-но-фильтрационные работы. Недра, Москва.
7. Шестаков В.М., Лехов М.В., 1975. Способ обработки данных кустовых откачек из несовершенных скважин при стабилизированном режиме. Экспресс-информация ВИЭМС. Гидрогеология и инженерная геология, № 9, с. 1–17.
8. Шестаков В.М., Невечеря И.К., 1986. Теория и методы интерпретации опытных откачек. Изд-во МГУ, Москва.
9. Mukha J., Banský V., 1976. Vyhodnotenie čerpacích kúšok na neuplných vrtoch v anizotropnom zvodnenom prostredí. Acta geol. et geogr. Universitatis Comenianae. Geology 29, Bratislava, 1976, pp. 195–238. (на чешском)
10. Muskat M., Wyckoff R.D., 1946. The flow of homogeneous fluids through porous media. Ann Arbor, USA, J.W. Edwards Inc., Michigan.
11. Weeks E.R., 1969. Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by aquifer test analysis. Water Res. Res. Vol. 5, № 5, pp. 196–214.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bochever F.M., Garmonov I.V., Lebedev A.V., Shestakov V.M., 1969. Fundamentals of hydrogeological calculations. Nedra, Moscow. (in Russian)

2. Bear J., Zaslavskii D., Irmay S., 1971. Physical and mathematical basis of water filtration. Mir, Moscow. (in Russian)
3. Zeegofer Ju.O., Shestakov V.M., 1972. Issues of the methodology for calculating partially penetrating wells. Proceedings of the Tashkent University, No. 424, Tashkent, pp. 51–62. (in Russian)
4. Lekhov M.V., 2002. Calculation of the correction for partially penetration of a well at a pumping test in a confined aquifer. Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology, No. 3, pp. 266–274. (in Russian)
5. Lekhov M.V., 2015. Modeling of wells in cross section of an unconfined aquifer. The 1WELL program. Engineering Geology, No. 3, pp. 52–64. (in Russian)
6. Shestakov V.M., Bashkatov D.N. (ed.), 1974. Field seepage test works. Nedra, Moscow. (in Russian)
7. Shestakov V.M., Lekhov M.V., 1975. A method of test data processing of cluster pumping from partially penetrating wells at stabilized regime. Express information of the VIEMS. Hydrogeology and Engineering Geology, No. 9, pp. 1–17. (in Russian)
8. Shestakov V.M., Nevecherya I.K., 1986. Theory and methods of interpreting pumping tests. Publishing house of the Moscow State University, Moscow. (in Russian)
9. Mukha J., Banský V., 1976. Vyhodnotenie čerpacích ckušok na neuplných vrtoch v anizotropnom zvodnenom prostred. Acta geol. et geogr. Universitatis Comenianae. Geology 29, Bratislava, 1976, pp. 195–238. (in Czech)
10. Muskat M., Wyckoff R.D., 1946. The flow of homogeneous fluids through porous media. Ann Arbor, USA, J.W. Edwards Inc., Michigan.
11. Weeks E.R., 1969. Determining the ratio of horizontal to vertical permeability by aquifer test analysis. Water Res. Res. Vol. 5, № 5, pp. 196–214.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ЛЕХОВ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

Ведущий научный сотрудник геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MIKHAIL V. LEKHOV

Leading researcher of the Geology Faculty, Lomonosov Moscow State University, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Moscow, Russia

ГЕОТЕХНИКА

Журнал для изыскателей, проектировщиков и строителей

Цель журнала — ознакомление российских специалистов с передовым отечественным и зарубежным опытом в области геотехники

Периодичность в 2019 году:

4 номера

Стоимость годовой подписки:

2880 рублей

info@geomark.ru

