

А. Н. СИНДАЛОВСКИЙ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОПЫТНЫХ ОПРОВОВАНИЙ
ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ
И СКВАЖИННЫХ ВОДОЗАБОРОВ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Л. Н. Синдаловский

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОПЫТНЫХ ОПРОБОВАНИЙ
ВОДОНОСНЫХ ПЛАСТОВ
И СКВАЖИННЫХ ВОДОЗАБОРОВ**
(программный комплекс ANSDIMAT)



Санкт-Петербург
«НАУКА»
2014

УДК 556
ББК 26.35
С38

Синдаловский Л. Н. Аналитическое моделирование опытных опробований водоносных пластов и скважинных водозаборов (программный комплекс ANSDIMAT). – СПб.: Наука, 2014. – 521 с.

ISBN 978-5-02-038377-7

Книга является руководством пользователя по работе с многофункциональным программным комплексом ANSDIMAT, ориентированным на интерпретацию опытно-фильтрационных опробований, а также расчет скважинных водозаборов. Подробно изложены все возможности программного комплекса, предложены удобные алгоритмы ввода данных и обработки исходной информации, описаны условия проведения полевых экспериментов и типовые гидрогеологические схемы. Большое место уделено математическому аппарату, интегрированному в компьютерный код программы. Содержится полезная справочная информация о расчетных схемах, аналитических решениях и способах обработки. Рассматривается технология моделирования скважинных систем для оценки эксплуатационных запасов подземных вод. Для водозаборов подземных вод реализованы аналитические методы определения зон санитарной охраны.

Книга предназначена для пользователей программным комплексом ANSDIMAT, а также для гидрогеологов, занимающихся вопросами опытного изучения водоносных систем, оценкой эксплуатационных запасов подземных вод и расчетами зон санитарной охраны водозаборов.

Рецензенты

чл.-кор. РАН *В. Г. Румынин*,
д-р геол.-минер. наук *С. П. Поздняков*

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 3.39.138.2014

ISBN 978-5-02-038377-7

© Л. Н. Синдаловский, 2014
© Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Программный комплекс ANSDIMAT (Analytical and Numerical Solutions Direct and Inverse Methods for Aquifer Test – аналитические и численные решения прямыми и обратными методами для опытных опробований водоносных пластов) предназначен для обработки опытно-фильтрационных опробований аналитическими и графоаналитическими методами практически по всем распространенным в гидрогеологической практике типовым расчетным схемам. Большинство схем учитывает влияние плановых и профильных границ с различным типом условий на них. Комплекс предусматривает возможность обработки данных, полученных при проведении откачек как с одной опытной скважиной, так и с системой взаимодействующих скважин. Расход каждой скважины может произвольно меняться во времени. Определение фильтрационных параметров осуществляется по периоду понижения и восстановления уровня в опытной или наблюдательной скважине.

В комплексе представлены аналитические зависимости для напорного водоносного пласта, безнапорного, напорно-безнапорного, плано-неоднородного, водоносных комплексов с перетеканием и слоистых (многопластовых) систем, позволяющих учитывать изменение уровня в смежных пластах и емкость разделяющих слабопроницаемых слоев. Дополнительно пользователю при анализе результатов опытных опробований предлагается оценить влияние плановой и профильной анизотропии, переменной мощности и наклона изучаемых пластов.

В комплексе учитываются несовершенство опытной и наблюдательной скважин по степени вскрытия водоносных пластов, наклон скважины, а также емкость и кольматация опытной

скважины, конфигурация пьезометра и его инерционность. Для ряда решений предусмотрена возможность сравнить понижение, полученное в пьезометре, с осредненным понижением по длине фильтра наблюдательной скважины.

Программный комплекс включает аналитические зависимости, описывающие понижение в трещиновато-пористых средах различной структуры (например, слоистая или ортогональная система трещин). При этом фильтрационные параметры трещин и блоков оцениваются по изменению уровня как в трещине, так и в блоке. Здесь же учитываются размер, форма блоков и скин-эффект трещин. Рассмотрены решения для оценки изменения уровня в водоносном пласте для случая, когда опытная скважина пересекает одиночную вертикальную или горизонтальную трещину.

В комплексе реализован ряд решений для обработки экспресс-опробований, проведенных в различных гидрогеологических условиях. Несмотря на свою малую информативность, этот способ опробования водоносных пластов все чаще используется на практике в силу своей простоты и дешевизны. Отдельно рассмотрена возможность оценки фильтрационных параметров по данным, полученным при откачке с постоянным понижением в опытной скважине.

Комплекс дополнен модулем решения обратных задач, адаптированный для всех нестационарных аналитических зависимостей, находящихся в программном комплексе. Для специалистов, занимающихся численным моделированием, в программу добавлены два численных кода для решения осесимметричных задач фильтрации. Последнее позволяет интерпретировать опытные опробования в сложных гидрогеологических условиях, когда не представляется возможным сделать схематизацию, соответствующую типовой расчетной схеме, включенной в программный комплекс.

ANSDIMAT является программным продуктом, который востребован не только специалистами, занимающимися производственной деятельностью, – оценкой фильтрационных параметров водоносных пластов по данным опытных опробований, но может оказаться полезным для научных работников, изучающих аналитические и численные решения задач фильтрации. Практически для всех расчетных схем приводится несколько альтернативных решений для интерпретации опытных опробо-

ваний. Эти решения широко освещены в гидрогеологической литературе, имеют свою историю, свои преимущества и недостатки. В их разработке участвовали такие известные в гидрогеологии авторы, как Тейс (Theis), Джейкоб (Jacob), Хантуш (Hantush), Купер (Cooper), Болтон (Boulton), Ньюман (Neuman), Менч (Moench) и др. Исследователь получает возможность проводить быстрый и наглядный сравнительный анализ решений, проверять достоверность тех или иных зависимостей во времени и пространстве, используя численное моделирование.

Программный комплекс ANSDIMAT – это современная, многомодульная, постоянно развивающаяся и пополняющаяся структура, которая на сегодняшний момент включает:

- широкий выбор типовых расчетных гидрогеологических схем;

- набор нестационарных аналитических решений (около 200) для обработки опытно-фильтрационных опробований прямыми и обратными методами; в том числе используются алгоритмы таких известных программ, как: DELAY2 (Ньюман, 1986 г.), DP_LAQ (Менч, 1990 г.), WTAQ2 (Менч, 1995 г.), WTAQ3 (Менч, 1997 г.), WHI (Чжан, Злотник, 2001 г.), WTAQ v.2 (Барлоу, Менч, 2011 г.);

- набор квазистационарных и стационарных решений для графоаналитической обработки опытно-фильтрационных опробований способом прямой линии (более 100 решений) и способом эталонных кривых (программа строит более 50 их разновидностей);

- редактор для ввода журнала откачек и подготовки файлов в формате программы ANSDIMAT;

- графический редактор для построения графиков индикаторных кривых (порядка 40 видов графиков временного, площадного и комбинированного прослеживания) и интерпретации опытно-фильтрационных опробований всеми доступными методами;

- систему экспорта и импорта табличных данных и графических изображений (в том числе в формат программы Excel);

- модуль формирования отчетов;

- программу UCODE, адаптированную для решения обратных задач аналитики;

- интерактивную справочную систему по использованию всех модулей программного комплекса с подробным описанием аналитических зависимостей, заложенных в него.

В оболочку программного комплекса ANSDIMAT интегрированы специализированные модули, расширяющие возможности анализа опытно-фильтрационных опробований:

- программа AMWELLS: аналитическое моделирование скважинных систем и расчет зон санитарной охраны;
- программа ANSQUICK: быстрая оценка изменения уровня в наблюдательной скважине в процессе опытного опробования;
- программа ANSDARIAL: графический интерфейс для создания численных осесимметричных моделей (препроцессор) и просмотра выходных данных (постпроцессор) программ MODFE и RADFLOW.

Программный комплекс ANSDIMAT разработан в Институте геоэкологии Российской академии наук (Санкт-Петербургское отделение) и в Санкт-Петербургском государственном университете. Комплекс прошел все необходимые тесты и испытания, апробирован во многих геологических организациях и университетах России. Для пользователей программы периодически проходят тренинги и семинары. Программный комплекс зарегистрирован в Государственном реестре программ Российской Федерации: сертификаты № 2009614366 (ANSDIMAT), № 2012613126 (AMWELLS), № 2013614265 (ANSQUICK), № 2013614263 (ANSDARIAL).

Основные дополнения программного комплекса

Предыдущая работа автора (Синдаловский, 2011) была посвящена программному комплексу ANSDIMAT версии 6.4. Функциональные возможности настоящей версии (8.5) значительно расширены, в программный код внесен ряд существенных изменений, которые помогут пользователю получить больше информации об изучаемых водоносных пластах и улучшить свою профессиональную работу.

В первую очередь, развитие ANSDIMAT было направлено на создание технологии моделирования скважинных систем для оценки эксплуатационных запасов подземных вод, на реализацию аналитических методов определения зон санитарной охраны водозаборов и на ускоренные методы оценки полевых экспериментов.

Ниже перечислены основные дополнения, реализованные в программном комплексе и включенные в данную книгу.

1. Добавлены новые схемы и решения: схемы со сложными граничными условиями, решения для откачки из горизонтальной и наклонной скважин, откачки в безнапорном пласте с учетом влияния капиллярных сил и др.

2. Создана система экспорта расчетных данных и графиков в редактор Excel.

3. Создана система формирования отчетов по результатам интерпретации опытного опробования и расчетам зон санитарной охраны.

4. Расширены возможности оформления графиков индикаторных кривых, разработан модуль сохранения результатов обработки в формате ANSDIMAT.

5. Программа перестроена на новый модуль решения обратных задач: UCODE_2005.

6. Разработана и интегрирована в оболочку комплекса программа AMWELLS, предназначенная для аналитического моделирования скважинных систем и расчета зон санитарной охраны.

7. Разработана и интегрирована в оболочку комплекса программа ANSQUICK, предназначенная для быстрой оценки изменения уровня в процессе опытного опробования в режиме калькулятора.

8. Комплекс дополнен справочно-информационной системой, состоящей из набора вспомогательных расчетных инструментов для гидрогеолога: вычисление параметров, специальных функций, пересчет размерности и т.д. На основе литературных источников создана база данных фильтрационных параметров для различных типов пород.

ЛИТЕРАТУРА

- Аверьянов С.Ф.* Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха // Доклады АН СССР. 1949. Т. 69, № 2. С. 141–144.
- Аравин В.И., Нумеров С.Н.* Теория движения жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953.
- Бабушкин В.Д.* Определение водопроницаемости анизотропных пород методом опытных откачек // Разведка и охрана недр. 1954а. № 6. С. 50–53.
- Бабушкин В.Д.* Определение водопроницаемости горных пород под руслом рек // Разведка и охрана недр. 1954б. № 4. С. 45–53.
- Бабушкин В.Д., Плотников И.И., Чуйко В.М.* Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород. М.: Недра, 1974.
- Биндеман Н.Н.* Методы определения водопроницаемости горных пород откачками, наливками и нагнетаниями. М.: Углетехиздат, 1951.
- Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973.
- Бочеввер Ф.М.* Неустановившийся во времени приток грунтовых вод к скважине в долинах рек // Изв. АН СССР. ОТН. 1959. № 5. С. 115–118.
- Бочеввер Ф.М.* Расчет водозаборных и водопонизительных скважин в «закрытых пластах» // Вопросы гидрогеологических расчетов водозаборов и дренажей: Сб. ст. М.: ВОДГЕО, Госстройиздат, 1963. № 5. С. 65–94.
- Бочеввер Ф.М.* Теория и практические методы расчета эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Недра, 1968.
- Бочеввер Ф.М., Гылыбов М.М.* Оценка заиленности и неоднородности русловых отложений по данным откачек // Разведка и охрана недр. 1966. № 2. С. 44–49.
- Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е.* Защита подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1979.
- Бочеввер Ф.М., Лапшин Н.Н., Хохлатов Э.М.* Расчет притока подземных вод к скважинам в долинах рек // Разведка и охрана недр. 1968. № 9. С. 44–49.
- Гавич И.К.* Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988.
- Гиринский Н.К.* Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившихся дебите и понижениях. М.: Госгеолиздат, 1950.
- Зеегофер Ю.О., Шестаков В.М.* Методика обработки данных опытных откачек вблизи реки // Разведка и охрана недр. 1968. № 9. С. 38–44.
- Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.

Керкис Е. Определение коэффициента водопроницаемости горных пород комбинированным методом откачки-нагнетания // Советская геология. 1956. Сб. 56. С. 83–95.

Максимов В.А. О неустановившемся притоке упругой жидкости к скважинам в неоднородной среде // ПМТФ. 1962. № 3. С. 109–112.

Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1996.

Мироненко В.А., Сердюков Л.И. Обработка результатов опытных откачек, проведенных в условиях двухслойной толщи // Разведка и охрана недр. 1968. № 10. С. 34–38.

Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978.

Проектирование водозаборов подземных вод / Под ред. Ф.М. Бочевера. М.: Стройиздат, 1976.

Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1973.

Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1983.

Рошаль А.А. Методы определения миграционных параметров. Обзор ВИЭМС. Сер. Гидрогеология и инженерная геология. М., 1980.

СанПиН 2.1.4.1110-02. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения. 2002.

Синдаловский Л.Н. ANSDIMAT – программный комплекс для определения параметров водоносных пластов. СПб.: Наука, 2011.

Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006.

Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица, И. Стеган. М.: Наука, 1979.

Форхгеймер Ф. Гидравлика. М.; Л.: ОНТИ, 1930.

Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1973.

Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995.

Шелкачев В.Н., Ланук Б.Б. Подземная гидравлика. М.: Гостоптехиздат, 1949.

Barlow P., Moench A.F. WTAQ version 2 – a computer program for analysis of aquifer tests in confined and water-table aquifers with alternative representations of drainage from the unsaturated zone // U.S. Geological Survey. 2011. Techniques and Methods 3-B9.

Boulton N.S. The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1954. Vol. 3, N 3. P. 564–579.

Boulton N.S. Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1963. Vol. 26. P. 469–482.

Bowser H. The Bouwer and Rice slug test – an update // Ground Water. 1989. Vol. 27, N 3. P. 304–309.

Bowser H., Rice R.C. A slug test for determining conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells // Water Resources Research. 1976. Vol. 12, N 3. P. 423–428.

Cooley R.L., Case C.M. Effect of a water table aquitard on drawdown in an underlying pumped aquifer // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 2. P. 434–447.

Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S. Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water // *Water Resources Research*. 1967. Vol. 3, N 1. P. 263–269.

Cooper H.H., Jacob C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history // *Transactions, American Geophysical Union*. 1946. Vol. 27, N 4. P. 526–534.

Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris, 1856.

Deutsch C.V., Journal A.G. GSLIB. Geostatistical software library and user's guide. New York; Oxford: Oxford University Press, 1992

Fenske P.R. Unsteady drawdown in the presence of a linear discontinuity // *Groundwater Hydraulics*. 1984. N 9. P. 125–145.

Ferris J.G., Knowles D.B., Brown R.N., Stallman R.W. Theory of aquifer test // U.S. Geological Survey Water-Supply. 1962. Paper 1536-E.

Gardner W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table // *Soil Science*. 1958. Vol. 85. P. 228–232.

Gringarten A.C., Ramey H.J., Jr. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1974. Vol. 14, N 4. P. 413–426.

Gringarten A.C., Ramey H.J., Jr., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture // *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1974. Vol. 14, N 4. P. 347–360.

Guyonnet D., Mishra S., Mccord J. Evaluating the volume of porous medium investigated during slug tests // *Ground Water*. 1993. Vol. 31, N 4. P. 627–633.

Hantush M.S. Nonsteady flow to flowing wells of leaky aquifers // *Journal of Geophysical Research*. 1959. Vol. 64, N 8. P. 1043–1052.

Hantush M.S. Modification of the theory of leaky aquifers // *Journal of Geophysical Research*. 1960. Vol. 65, N 11. P. 3713–3725. Русск. изд.: Хантуш М.С. Новое в теории претекания // *Вопросы гидрогеологических расчетов*. М.: Мир, 1964. С. 43–60.

Hantush M.S. Aquifer tests on partially penetrating wells // *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1961a. Vol. 87, N HY5, P. 171–195.

Hantush M.S. Drawdown around a partially penetrating well // *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1961b. Vol. 87, N HY4. P. 83–98. Русск. изд.: Хантуш М.С. Неустановившийся приток подземных вод к скважине, несовершенной по степени вскрытия // *Вопросы гидрогеологических расчетов*. М.: Мир, 1964. С. 61–85.

Hantush M.S. Flow of ground water in sands of nonuniform thickness. Part 3. Flow to wells // *Journal of Geophysical Research*. 1962a. Vol. 67, N 4. P. 1527–1534.

Hantush M.S. Hydraulics of gravity wells in sloping sands // *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*. 1962b. Vol. 88, N HY4. P. 1–15.

Hantush M.S. Hydraulics of wells // *Advances in Hydroscience / Edited by Ven Te Chow*. New York; London: Academic Press, 1964. Vol. 1. P. 281–432.

Hantush M.S. Wells near streams with semipervious beds // *Journal of Geophysical Research*. 1965. Vol. 70, N 12. P. 2829–2838. Русск. изд.: Хантуш М.С. Скважины вблизи рек со слабопроницаемым ложем. Пер. ст. по гидрогеологии и инженерной геологии. Динамика подземных вод. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1968. Вып. 8. С. 43–62.

- Hantush M.S.* Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers // Journal of Geophysical Research. 1966. Vol. 71, N 2. P. 421–426.
- Hantush M.S.* Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer // Journal of Geophysical Research. 1967. Vol. 72, N 6. P. 1709–1720.
- Hantush M.S., Jacob C.E.* Flow to an eccentric well in a leaky circular aquifer // Journal of Geophysical Research. 1960. Vol. 65, N 10. P. 3425–3431.
- Hantush M.S., Jacob C.E.* Plane potential flow of ground water with linear leakage // Transactions, American Geophysical Union. 1954. Vol. 35, N 6. P. 917–936.
- Hantush M.S., Jacob C.E.* Non-steady Green's functions for an infinite strip of leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955a. Vol. 36, N 1. P. 101–112.
- Hantush M.S., Jacob C.E.* Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955b. Vol. 36, N 1. P. 95–100.
- Hantush M.S., Thomas R.G.* A method for analyzing a drawdown test in anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1966. Vol. 2, N 2. P. 281–285.
- Hvorslev M.J.* Time lag and soil permeability in groundwater observations // U.S. Army Corps Eng, Waterways Station, Vicksburg, MS. 1951. Bull. 36.
- Jacob C.E.* Effective radius of drawdown test to determine artesian well // Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1946a. Vol. 72, N 5. P. 629–646.
- Jacob C.E.* Flow of ground water // Engineering Hydraulics / Ed. by H. Rouse. New York; London: John Wiley & Sons, 1949. Chap. 5. P. 321–386.
- Jacob C.E.* Radial flow in a leaky artesian aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1946b. Vol. 27, N 2. P. 198–205. *Don Kirkham*: Discussion. P. 206–208.
- Jacob C.E.* The recovery method for determining the coefficient of transmissibility // Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 283–292. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.
- Jacob C.E., Lohman S.W.* Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1952. Vol. 33, N 4. P. 559–569.
- Jaeger J.C.* The analysis of aquifer test data or thermal conductivity measurements which use a line source // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64, N 5. P. 561–564.
- Jenkins D.N., Prentice J.K.* Theory for aquifer test analysis in fractured rocks under linear (nonradial) flow conditions // Ground Water. 1982. Vol. 20, N 1. P. 12–21.
- Johnson G.S., Cosgrove D.M.* RADFLOW: a numerical model for pumping test analysis. Users manual // Idaho Water Resources Research Institute. University of Idaho, 2001.
- Kabala Z.J.* The dipole flow test: a new single-borehole test for aquifer characterization // Water Resources Research. 1993. Vol. 29, N 1. P. 99–107.
- Lai R.Y.S., Chen-Wu Su.* Nonsteady flow to a large well in a leaky aquifer // Journal of Hydrology. 1974. Vol. 22, N 3/4. P. 333–345.
- Logan J.* Estimating transmissibility from routine production tests of water wells // Ground Water. 1964. Vol. 2, N 1. P. 35–37.
- Mathias S.A., Butler A.P.* Linearized Richards' equation approach to pumping test analysis in compressible aquifers // Water Resources Research. 2006. Vol. 42, W06408, doi: 10.1029/2005WR004680.

Moench A.F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin // *Water Resources Research*. 1984. Vol. 20, N 7. P. 831–846.

Moench A.F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers // *Water Resources Research*. 1985. Vol. 21, N 8. P. 1121–1131.

Moench A.F. Computation of type curves for flow to partially penetrating wells in water-table aquifers // *Ground Water*. 1993. Vol. 31, N 6. P. 966–971.

Moench A.F. Flow to a well in a water-table aquifer: an improved Laplace transform solution // *Ground Water*. 1996. Vol. 34, N 4. P. 593–596.

Moench A.F. Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer // *Water Resources Research*. 1997. Vol. 33, N 6. P. 1397–1407.

Moench A.F., Prickett T.A. Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions // *Water Resources Research*. 1972. Vol. 8, N 2. P. 494–499.

Muskat M. The flow of homogeneous fluids in porous media. New York; London: McGraw-Hill Book Co., 1937. Русск. изд.: *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.: Гостоптехнадзор, 1949.

Neuman S.P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response // *Water Resources Research*. 1972. Vol. 8, N 4. P. 1031–1045.

Neuman S.P. Supplementary comments on «Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response» // *Water Resources Research*. 1973. Vol. 9, N 4. P. 1102–1103.

Neuman S.P. Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response // *Water Resources Research*. 1974. Vol. 10, N 2. P. 303–312.

Neuman S.P. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers // *Water Resources Research*. 1975. Vol. 11, N 2. P. 329–345.

Neuman S.P. Perspective on «Delayed yield» // *Water Resources Research*. 1979. Vol. 15, N 4. P. 899–908.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Theory of flow in aquicludes adjacent to slightly leaky aquifers // *Water Resources Research*. 1968. Vol. 4, N 1. P. 103–112.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Applicability of current theories of flow in leaky aquifers // *Water Resources Research*. 1969a. Vol. 5, N 4. P. 817–829.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Theory of flow in a confined two aquifer system // *Water Resources Research*. 1969b. Vol. 5, N 4. P. 803–816.

Papadopoulos I.S., Cooper H.H. Drawdown in a well of large diameter // *Water Resources Research*. 1967. Vol. 3, N 1. P. 241–244.

Picking L.W. Analyzing the recovery of a finite-diameter well after purging at an unknown rate – A substitute for slug-testing // *Ground Water*. 1994. Vol. 32, N 1. P. 91–95.

Poeter E.P., Hill M.C., Banta E.R., Mehl S., Christensen S. UCODE_2005 and six other computer codes for universal sensitivity analysis, calibration, and uncertainty evaluation // U.S. Geological Survey. 2005. Techniques and Methods 6-A11.

Sternberg Y.M. Some approximate solutions of radial flow problems // *Journal of Hydrology*. 1969. Vol. 33, N 2. P. 158–166.

Sunjoto S. Infiltration well and urban drainage concept // *Future groundwater at risk. Proceedings of the Helsinki Conference*. 1994. P. 527–532.

Theis C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // *Transactions, American Geophysical Union*. 1935. Vol. 35, pt. 2. P. 519–524.

Tokar L.J. A modular finite-element model (MODFE) for areal and axisymmetric ground-water-flow problems, part I: model description and user's manual // Techniques of water-resources investigations of the U.S. Geological Survey. 1993. Book 6. Chapter A3.

Warren J.E., Root P.J. The behavior of naturally fractured reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal. 1963. Vol. 3, N 3. P. 245–255.

Zhan H., Park E. Horizontal well in leaky aquifers // Journal of Hydrology. 2003. Vol. 281. P. 129–146.

Zhan H., Wang L.V., Park E. On the horizontal-well pumping tests in anisotropic confined aquifers // Journal of Hydrology. 2001. Vol. 252. P. 37–50.

Zhan H., Zlotnik V.A. Groundwater flow to a horizontal or slanted well in an unconfined aquifer // Water Resources Research. 2002. Vol. 38, N 7, 10.1029/2001WR000401.

Zlotnik V., Ledder G. Theory of dipole flow in uniform anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1996. Vol. 32, N 4. P. 1119–1128.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Описание программного комплекса ANSDIMAT.....	8
1.1. Начало работы с программным комплексом.....	9
1.1.1. Запуск программного комплекса.....	9
1.1.2. Создание нового проекта.....	10
1.1.3. Открытие проекта для обработки.....	20
1.1.4. Редактирование ранее созданного проекта.....	21
1.1.5. Работа с диалоговыми окнами.....	22
1.2. Главное меню программы ANSDIMAT.....	23
1.3. Ввод данных ОФО: диалоговое окно <i>«Редактор для ввода данных опытно-фильтрационного опробования»</i>	34
1.3.1. Общая информация по опытному опробованию: вкладка <i>«Опробование»</i>	35
1.3.2. Ввод табличных данных по опытному опробованию: вкладка <i>«Данные»</i>	38
1.3.3. Вспомогательные действия для ввода данных: вкладка <i>«Опции»</i>	54
1.4. Выбор расчетной схемы: диалоговое окно <i>«Выбор расчетной схемы»</i>	56
1.5. Выбор условий проведения опробования: диалоговое окно <i>«Условия проведения опробования»</i>	59
1.6. График индикаторных кривых.....	61
1.6.1. Выбор графика, скважин и замеров: диалоговое окно <i>«Выбор графика»</i>	68
1.6.2. Вид графика.....	72
1.6.3. Просмотровые графики.....	81
1.6.4. График расхода.....	83
1.6.5. Режим просмотра данных.....	91
1.6.6. Настройки.....	95
1.7. Обработка ОФО.....	96
1.7.1. Аналитический способ обработки: подбор параметров.....	96

1.7.2.	Графоаналитическая обработка.....	114
1.7.3.	Способ биссектрисы.....	126
1.7.4.	Решение обратной задачи.....	128
1.8.	Сохранение данных.....	137
1.8.1.	Экспорт данных в текстовый формат.....	138
1.8.2.	Сохранение и загрузка графика.....	139
1.8.3.	История обработки.....	141
1.8.4.	Экспорт графика в Excel.....	142
1.8.5.	Подготовка отчета.....	143
1.9.	Справочная система.....	145
1.9.1.	Вычисление параметров.....	145
1.9.2.	Вычисление функций.....	148
1.9.3.	Пересчет размерности.....	150

Глава 2. Аналитические зависимости: откачка с постоянным расходом из одной опытной скважины.....	151
2.1. Изолированный напорный водоносный пласт.....	152
2.1.1. Неограниченный в плане водоносный пласт (схема Тейса) ..	152
2.1.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт.....	156
2.1.3. Ограниченный в плане водоносный пласт (пласт-полоса).....	159
2.1.4. Угловой пласт.....	166
2.1.5. U-образный пласт (полуограниченный пласт-полоса).....	169
2.2. Точечный источник: несовершенная скважина в напорном водоносном пласте.....	174
2.2.1. Неограниченный водоносный пласт в плане и разрезе.....	175
2.2.2. Полуограниченный пласт для точечного источника.....	176
2.2.3. Ограниченный пласт для точечного источника.....	180
2.3. Линейный источник: несовершенная скважина в напорном водоносном пласте.....	183
2.3.1. Неограниченный водоносный пласт в плане и разрезе.....	183
2.3.2. Полуограниченный пласт для линейного источника.....	186
2.3.3. Ограниченный пласт для линейного источника.....	191
2.4. Безнапорный водоносный пласт.....	199
2.4.1. Неограниченный в плане водоносный пласт.....	200
2.4.2. Полуограниченные и ограниченные (пласт-полоса) в плане водоносные пласты.....	209
2.5. Водоносный комплекс с перетеканием.....	209
2.5.1. Перетекание из водоносного пласта с постоянным напором	210
2.5.2. Перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором	219
2.5.3. Перетекание с учетом емкости разделяющего слоя.....	222
2.5.4. Профильно-анизотропный водоносный пласт.....	228
2.6. Двухслойный водоносный комплекс.....	230
2.7. Слоистые системы.....	233
2.7.1. Трехслойные системы.....	234

2.7.2. Двухслойные системы.....	238
2.8. Планово-неоднородный пласт.....	241
2.9. Откачка около реки.....	245
2.10. Наклонный водоносный пласт.....	249
2.11. Трещиновато-пористая среда.....	253
2.11.1. Решения Менча.....	253
2.11.2. Скважина в вертикальной трещине.....	256
2.11.3. Скважина в горизонтальной трещине.....	258

Глава 3. Аналитические зависимости для различных условий проведения опытных опробований.....

3.1. Откачка из горизонтальной скважины.....	261
3.1.1. Напорный пласт.....	262
3.1.2. Безнапорный пласт.....	263
3.1.3. Водоносный комплекс с перетеканием.....	264
3.2. Откачка с постоянным понижением.....	266
3.3. Экспресс-опробование.....	267
3.3.1. Решения Купера и Пикинга.....	268
3.3.2. Решение Бауэра–Райса.....	269
3.3.3. Решения Хворослева.....	272
3.4. Групповая откачка с постоянным расходом.....	273
3.4.1. Изолированный напорный водоносный пласт (совершенная скважина).....	274
3.4.2. Точечный источник в неограниченном в плане и разрезе напорном водоносном пласте.....	283
3.5. Откачка с переменным расходом.....	283
3.5.1. Одна опытная скважина с переменным расходом.....	286
3.5.2. Несколько опытных скважин с переменным расходом.....	287
3.6. Восстановление уровня.....	288
3.6.1. Одна опытная скважина с постоянным расходом.....	291
3.6.2. Несколько опытных скважин с постоянным расходом.....	304
3.6.3. Переменный расход.....	307

Глава 4. Способы обработки данных опытно-фильтрационных опробований.....

4.1. Графоаналитические способы.....	310
4.1.1. Способ прямой линии.....	310
4.1.2. Способ горизонтальной прямой линии.....	312
4.1.3. Способ эталонной кривой.....	313
4.2. Способ биссектрисы.....	315
4.3. Аналитические способы.....	317
4.3.1. Решение прямой задачи: способ «ручного» подбора параметров.....	317

4.3.2. Решение обратной задачи: способ «автоматического» подбора параметров	320
Глава 5. Программа ANSQUICK	324
5.1. Расчетные схемы	328
5.1.1. Напорный пласт	328
5.1.2. Безнапорный пласт	328
5.1.3. Водоносный комплекс с перетеканием	329
5.1.4. Двухслойный комплекс	335
5.1.5. Слоистая система	336
5.1.6. Полуограниченные и ограниченные пласты	337
5.1.7. Несовершенная скважина	339
5.1.8. Откачка с постоянным понижением	340
5.1.9. Экспресс-опробование	342
5.2. Стационарные решения	343
5.2.1. Откачка около реки	343
5.2.2. Дуплет	348
5.2.3. Круговой пласт	354
5.2.4. Плано-неоднородный пласт	364
5.3. Дополнительные возможности	372
5.3.1. Расчет восстановления уровня	372
5.3.2. Построение графиков	373
5.3.3. Вспомогательные расчеты	375
Глава 6. Программа AMWELLS	384
6.1. Создание аналитической модели	386
6.2. Работа с аналитической моделью	389
6.2.1. Размер модели и граничные условия	396
6.2.2. Инструменты управления	400
6.2.3. Задание скважин и временных замеров	405
6.2.4. Фильтрационные параметры модели	415
6.3. Режим расчета изменения уровня в выбранной точке модельной области	417
6.4. Построение графиков и карт гидроизогипс	419
6.4.1. Графики изменения уровня	420
6.4.2. Построение карт гидроизогипс	423
6.5. Режим модельной сетки	427
6.5.1. Аналитический расчет изменения уровня на модельной сетке	429
6.5.2. Просмотр результатов на модельной сетке	433
6.5.3. Построение разреза	441
6.6. Экспорт данных в ANSDIMAT	444
6.7. Зоны санитарной охраны	445
6.7.1. Расчет зон санитарной охраны	449

6.7.2. Построение траектории движения частицы	452
6.7.3. Настройки для расчета и отображения зон санитарной охраны.....	452
6.7.4. Расчет площади зон санитарной охраны и подготовка отчета.....	455
Глава 7. Численный блок: программа ANSRADIAL	459
Приложение 1. Фильтрационные параметры.....	464
Приложение 2. Границы фильтрационного потока	469
Приложение 3. Список решений	479
Приложение 4. Функциональные зависимости.....	491
Приложение 5. Алгоритмы ввода данных для распространенных схем и условий опробования.....	494
Приложение 6. Сообщения об ошибках	502
Условные обозначения	506
Литература	510
Список алгоритмов.....	516

Научное издание

**Леонид Наумович
Синдаловский**

**Аналитическое моделирование опытных опробований
водоносных пластов и скважинных водозаборов
(программный комплекс ANSDIMAT)**

*Утверждено к печати
Научно-техническим советом
Санкт-Петербургского отделения
Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН
(Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН)*

Редактор издательства *Т. П. Жукова*
Художник *П. Палей*
Технический редактор *О. В. Новикова*

Лицензия ИД № 02980 от 06 октября 2000 г.
Подписано к печати 21.04.2014
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 33.0. Уч.-изд. л. 27.1
Тираж 200. Тип. зак. № 1237. С 183

Санкт-Петербургская издательская книоторговая фирма «Наука» РАН
199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1.
E-mail: main@nauka.nw.ru
Internet: www.naukaspb.com

Первая Академическая типография «Наука»
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-02-038377-7



9785020383777