

Российский научный центр «Курчатовский институт»

На правах рукописи

УДК 519.633

Расторгуев Иван Александрович

**Решение задач фильтрации устойчивыми явными
методами**

05.13.11- Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва - 2006

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping letters, likely the author's name, located in the bottom right corner of the page.

Работа выполнена в Российском научном центре «Курчатовский институт»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Лебедев Вячеслав Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Алексеев Владимир Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор
Гуревич Михаил Исаевич

Ведущая организация Казанский Государственный университет

Защита диссертации состоится _____ 2006 г. в ____ ч. ____ мин.
на заседании диссертационного совета Д 520.009.04 в Российском научном центре
«Курчатовский институт» по адресу 123182, г. Москва, пл. Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РНЦ «Курчатовский институт»

Автореферат разослан _____ 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Г.В. Яковлев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Задачи фильтрации в пористых средах имеют практическое значение для исследований, связанных с:

- защитой окружающей среды (прогнозы распространения загрязнения);
- гидротехникой (фильтрация вблизи плотин, водохранилищ и других гидротехнических сооружений);
- гражданским строительством (дренаж фундаментов и подвалов зданий);
- сельским хозяйством (ирригация и дренаж сельскохозяйственных полей)
- водоснабжением и нефтегазодобычей.

В каждой из указанных выше областей применения задач фильтрации существует практическая потребность в численных методах, позволяющих решить задачи многомерной линейной (напорной) и нелинейной (безнапорной или ненасыщенной) фильтрации. В сегодняшней практике для численного решения фильтрационных задач, как правило, используются методы, основанные на неявном способе аппроксимации производной по времени. Неявные методы в случае линейной задачи не имеют ограничений на временной шаг, однако, при решении нелинейных задач они требуют итераций для уточнения нелинейных параметров, и уменьшения размера для временного шага.

Альтернативой для неявных методов может оказаться использование специальных явных разностных схем, которые не требуют итераций, не имеют ограничений, связанных с шагом по времени, знаком нелинейного оператора, и имеют преимущества перед неявными методами при решении «жестких»¹ задач. Подобными достоинствами обладает «солвер», предложенный В.И.Лебедевым - DUMKA, который обладает следующими свойствами:

- использует явный способ записи дифференциального оператора;
- в нем задействован механизм выбора переменных шагов по времени, основанный на T - последовательностях полиномов Чебышева;
- применительно к нелинейным задачам, метод не использует итераций и в связи с этим требует меньше временных затрат для расчетов.

¹ Постановка условия жестких задач дана в книге В.И.Лебедева «Функциональный анализ и вычислительная математика. Москва. Физматлит 2000»

Цели и задачи работы

Целью данной работы является анализ эффективности, тестирование и программная реализация явного метода DUMKA для решения задач фильтрации. Для достижения цели диссертации рассмотрены решения нелинейных задач фильтрации, для которых метод DUMKA наиболее перспективен:

- численная одномерная и двумерная модели экспресс-налива в скважину; [4, 10];
- обратная задача по определению параметров водоносного горизонта, основанная на модели экспресс-налива (реализованная автором в виде графического интерфейса, программа SLUG) [4, 5];
- численная одномерная и двумерная модели налива (откачки) в скважину с учетом эффектов инерции [10, 12];
- одномерная и двумерная модели насыщенной-ненасыщенной фильтрации [1, 2, 7, 8];
- двумерная модель капиллярного барьера [3].

Результаты работы, выносимые на защиту:

1. Метод решения обратной задачи по определению параметров водоносного горизонта, реализованной в виде программы SLUG.
2. Численная двумерная модель налива (откачки) в скважину с учетом эффектов инерции.
3. Двумерная модель капиллярного барьера.

Методы исследования

Основаны на базовых положениях теории экстремальных многочленов, наименее отклоняющихся от нуля; теории операторно-разностных схем; теории итерационных методов; численном моделировании с привлечением анализа экспериментальных материалов.

Научная новизна

На основе проведенных численных расчетов моделирования фильтрации жидкости в насыщенной-ненасыщенной области с использованием явного метода DUMKA создана оптимальная, с точки зрения временных затрат на вычисления, программа для моделирования капиллярного барьера.

Предложен новый подход и методика интерпретации экспериментальных данных эксперимента экспресс-налив.

Выведены дифференциальные уравнения, на основе которых создана численная модель, описывающая двумерный процесс взаимодействия скважина-пласт с учетом эффектов инерции.

Достоверность

Представленные в диссертации результаты обоснованы теоретическим анализом, численным моделированием и были верифицированы на экспериментальных данных.

Практическая значимость

Предложенная численная модель капиллярных барьеров может быть использована при проектировании хранилищ отходов. Созданная программа SLUG по определению параметров водоносных пластов может быть использована как инструмент, необходимый при проведении работ по опробованию скважин и пластов. Программа SLUG была успешно опробована на скважинах следующих объектов:

- площадка временных хранилищ радиоактивных отходов на территории РНЦ «Курчатовский институт» (результаты интерпретации приведены в диссертации);
- Обоснование дренажа взлетно-посадочной полосы в аэропорту Минеральные воды
- для обоснования защиты подземных вод от загрязнения на военной базе на озере Ладога;
- Московский Зоопарк;
- Калининградское целлюлозно-бумажное предприятие «Цепрусс»;
- Старообрядческий комплекс (бывшая улица Войтовича, г. Москва);
- Наблюдательные и артезианские скважины на территории бывшей гостиницы «Россия», г. Москва, улица Варварка, 6.

Апробация работы

Основные результаты докладывались на всероссийской молодежной научной школе-конференции «Численные методы решения линейных и нелинейных краевых задач» (г. Казань, КГУ, 2001, 2003, 2004), на международной конференции «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания»

(г. Обнинск, 2002), на всероссийском совещании по проблемам построения сеток для решения задач математической физики, посвященной памяти А.Ф.Сидорова (г. Новороссийск, 2002), на научно-производственной конференции «Инженерные изыскания в XXI веке» (Москва, ПНИИС, 2003), на научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НИИ ВОДГЕО» (Москва, ФГУП «НИИ ВОДГЕО», 2004), второй курчатовской молодежной научной школе (Москва, РНЦ «Курчатовский институт», 2004), на международной конференции «FEM-MODFLOW» (Чехия, Карловы Вары, 2004), на научно-производственной конференции «Урал атомный – Урал промышленный» (г. Екатеринбург, 2005), на всероссийской школе-семинаре «Современные проблемы математического моделирования» (г. Новороссийск, 2005), на конференции, проведенной фирмой Grundfos «Современное эффективное оборудование и технологии в проектировании, строительстве и эксплуатации систем водоснабжения из подземных источников» (г. Москва, 2005), на второй всероссийской конференции «Современные проблемы изучения и использования питьевых подземных вод (памяти Л.С.Язвина)» (г. Звенигород, 2006), на VI всероссийской молодежной школе-конференции "Численные методы решения задач математической физики" (Казань, 2006).

Личный вклад автора

Постановка и решение задач диссертации. Развитие современных методов численного моделирования для решения задач фильтрации. Выполнена верификация эффективности явного метода DUMKA с неявным методом, и определен тип задач, для которых алгоритм DUMKA наиболее эффективен. Решен ряд задач – о насыщенной-ненасыщенной фильтрации в одномерной и двумерной однородной и неоднородной областях, о капиллярных барьерах, о моделировании экспресс-наливов и динамики движения столба жидкости в стволе скважины с учетом инерции. Диссертантом предложен новый подход по определению параметров эксперимента экспресс-налив на основе численных методов. Этот подход была реализован в виде программы SLUG.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 7 в соавторстве. Из них 2 - статья в материалах международной конференции, 5 статей в сборниках трудов, 3 - в тезисах докладов всероссийских конференций и 2 в реферируемых журналах.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 155 страниц, в том числе 29 рисунков, 43 графиков, 17 таблиц. Список литературы состоит из 130 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы диссертации, изложены основные цели и задачи диссертации, показана их практическая значимость, представлена структура диссертации и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В настоящий момент общепринятым модельным уравнением, описывающим насыщенную-ненасыщенную фильтрацию принято уравнение Ричардса, а для фильтрации в насыщенных условиях используют уравнения Буссинеска. Оба типа задач фильтрации, описываемых уравнениями Ричардса и Буссинеска, относятся к классу «жестких» задач.

Большой вклад в разработку основ математического моделирования, исследование корректности постановок краевых задач параболического типа (типа задач фильтрации) и создание численных алгоритмов внесли математики: П.Я. Полубаринова-Кочина, В.И. Лебедев, Г.И. Марчук, Н.С. Бахвалов, В.И. Агошков, Р.П. Федоренко, А.В. Лапин, Г.М. Кобельков, Ю.В. Василевский, А.А. Самарский, В.Е. Шаманский. Разработке физических основ, выводу постановок, включая разработку методов расчетов, экспериментальным работам и численному моделированию уделено внимание в трудах – Я. Бэра, Б.С. Шержукова, В.С. Алексеева, Н.П. Куранова, В.М. Мироненко, В. Румынина, Р.Х. Каримова, В.М. Гаврилко, И.М. Гершановича, А.Д. Курманенко, А.Г. Тесля, Ф.М. Бочевера, Н.Н. Лапшина, А.А. Киселева, С.Ф. Григоренко, Э.А. Грикевича, В.М. Шестакова, С.О. Гриневского, А.В. Лехова, С.П. Позднякова, Р.С. Штенгелова, В. Кинзельбаха и др.

Первая глава посвящена физическому описанию процессов насыщенной-ненасыщенной фильтрации, приведены уравнения состояния Ван Генухтена, Брукса-Кури и основное уравнение ненасыщенной фильтрации – уравнение Ричардса (уравнение параболического типа), описывающее динамику движения ненасыщенной влаги:

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla(K(h)\nabla h) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (1)$$

где $C(h) = d\theta/dh$ – дифференциальная влагоемкость [1/L]; h – давление, измеряемое высотой водного столба [L]; θ – объемное влагосодержание, равное отношению объема пор, занятого водой, ко всему объему породы [L^3/L^3]; $K(h)$ – коэффициент фильтрации, [L/T]; z – вертикальная координата, предполагающая, что положительным является направление снизу вверх; t – время.

Для уравнений Брукса-Кури было использовано преобразование Кирхгофа, которое из-за вида уравнений Брукса-Кури может быть вычислено аналитическим образом. Преобразование Кирхгофа позволяет привести правую часть уравнения (1) вида $\nabla(K(h)\nabla h)$ к стандартному виду $\nabla^2(\psi(h))$. Плюс этого преобразования – оно сокращает временные затраты. Минус - преобразование легко реализуется только для однородных задач.

Динамика движения жидкости при насыщенном режиме фильтрации описывается уравнением Буссинеска, которое в радиальном представлении выглядит следующим образом:

$$\mu \frac{\partial h(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r T(r,t) \frac{\partial h(r,t)}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$T(r,t) = \begin{cases} K h(r,t), & h(r,t) < m \\ K m, & h(r,t) > m \end{cases}$$

где $h(r,t) = p(r,t) + z$ –напор воды, равный сумме величин давления и вертикальной координаты от выбранной плоскости сравнения (в данном случае от подошвы водоносного горизонта); r – расстояние от оси скважины; μ – водоотдача (гравитационная или упругая, в зависимости от типа водоносного горизонта); t – время; r_c – радиус скважины; $T(r,t)$ [L²/T] – гидропроводимость водоносного пласта; K [L/T] – коэффициент фильтрации; m [L] – мощность водоносного пласта (расстояние между верхним и нижним водоупорами).

В первом параграфе первой главы даны смешанные постановки для одномерной задачи насыщенной-ненасыщенной фильтрации. В следующем параграфе приводятся постановки задач насыщенной фильтрации - об экспресс-наливе, для одномерной и

двумерной задачах о притоке воды к скважине с учетом эффектов инерции. Третий параграф первой главы посвящен описанию пространственной дискретизации задач насыщенной-ненасыщенной фильтрации, четвертый – описанию задач об экспресс-наливке одномерной и двумерной задач с учетом инерции.

Алгоритму DUMKA отведен пятый параграф первой главы, в котором приведено краткое описание этого метода численного решения жестких задач. Описание включает в себя блочную схематизацию расчета с помощью DUMKA, интерфейс обращения к программным кодам. Приведена аналитическая формула эффективности DUMKA по сравнению с обычным явным методом Эйлера. Для обеспечения устойчивости счета в алгоритме DUMKA временные шаги связаны с параметрами многочленов Чебышева. Оценка показывает, что превосходство алгоритма DUMKA над явным методом равно степени этих полиномов.

Во второй главе приведены результаты численных расчетов для поставленных в первой главе задач, решения которых были получены с помощью алгоритма DUMKA:

- 1) одномерной насыщенной фильтрации (параграф 6);
- 2) одномерной насыщенной-ненасыщенной фильтрации (параграф 6);
- 3) одномерной неоднородной ненасыщенной фильтрации (параграф 6);
- 4) двумерной неоднородной ненасыщенной фильтрации (параграф 6);
- 5) профильной насыщенной-ненасыщенной фильтрации в пласте со скважиной (для этой задачи были просчитаны разные варианты, по которым было произведено сопоставление с программой VS2D) (параграф 7);
- 6) о капиллярных барьерах (параграф 8);
- 7) об экспресс-наливке (параграф 9);
- 8) об одномерном взаимодействии скважина-пласт с учетом инерции (параграф 9);
- 9) о двумерном взаимодействии скважина-пласт с учетом инерции (параграф 9).

Кратко приведем описание результатов расчетов, которые были выполнены для задач №№ 2,5,6,9.

Особенность задачи №2 заключается в том, что для ненасыщенной области используется конечно-разностная постановка (1), которая решается явным методом DUMKA. В насыщенной же области коэффициент перед производной по времени в (1) $C(h)$ равен нулю, задача становится эллиптической и решается неявным методом – методом верхней релаксации. Фронт просачивания движется, движется граница

раздела насыщенной и ненасыщенной области – задача превращается в задачу с подвижной границей.

Были получены три варианта решения задачи №2: с использованием уравнений на коэффициенты Ван Генухтена, Брукса-Кури и Брукса-Кури с преобразованием Кирхгофа. Для апробации построенного численного алгоритма были также выполнены расчеты с помощью программы SWMS_2D, разработанной геологической службой США (USGS). Важно отметить следующую особенность решения задач насыщенной-ненасыщенной фильтрации: вид фронта насыщения напоминает движение фронта типа «ступенька» при решении гиперболических задач.

Постановка задачи №5 (профильной насыщенной-ненасыщенной фильтрации в пласте со скважиной), приведенной в параграфе 7 второй главы была предложена автором для того, чтобы сопоставить эффективность расчетов явного алгоритма DUMKA по сравнению с неявными методами. Для сравнения была взята программа VS2D, которая использует метод неполной факторизации в качестве «солвера». Была решена линейная задача (насыщенной фильтрации) и нелинейная задача (насыщенной-ненасыщенной фильтрации). Результаты сопоставлений приведены в таблице 1. Расчеты для обоих «солверов» были выполнены с одинаковой точностью аппроксимации решения и говорят о близких временных затратах на решение линейной задачи и о существенном превосходстве DUMKA при решении нелинейной задачи.

Таблица 1. Процессорное время в условных временных единицах (у.в.е.), затраченное методами VS2D и DUMKA для решения линейной и нелинейной задач

задачи	VS2D	DUMKA
линейная	9	5
нелинейная	41	12

Решение задачи о капиллярных барьерах приведено в параграфе 8 второй главы. Капиллярные барьеры образуются в ненасыщенных условиях, когда слой мелкозернистых пород лежит на слое крупнозернистых отложений. Барьер возникает из-за разной проницаемости мелко-крупнозернистых пород в ненасыщенных условиях и расположения обоих слоев под определенным углом ($\varphi > 0$ к горизонтальной поверхности). Для оценки эффективности капиллярных барьеров существует аналитическая формула Росса:

$$L < \frac{\operatorname{tg}\varphi}{\gamma q} (K_s - q) \quad (3)$$

где L -длина непроницаемого для воды капиллярного барьера, φ -угол наклона барьера, γ - эмпирическая константа, K_s – коэффициент фильтрации мелкозернистого слоя при полном насыщении, q - инфильтрационное питание. Входящие в (3) значения K_s , q , γ относятся к верхнему мелкозернистому слою. Из формулы (3) следует, что капиллярный барьер существует, если угол наклона $\varphi > 0$ и инфильтрационное питание $q \ll K_s$. Формула Росса дает предельный размер капиллярного барьера. Она получена для установившихся условий с использованием ряда приближений.

В результате проведенных численных расчетов было найдено распределение давлений h , насыщенность порового пространства водой S и приток к нижней границе барьера, который можно интерпретировать как инфильтрационное питание и просачивание через барьер. График, характеризующий протекание через барьер, полученный по результатам расчетов с подробной дискретизацией, приведен на рис. 1. Из графика на рис. 1 следует, что при расчетах с подробной дискретизацией вблизи границы слоев достигается хорошее совпадение с формулой Росса. При этом численные расчеты показывают, что протекание через барьер начинается раньше, чем это следует из аналитического решения и защитное действие барьера оказывается больше, чем по решению Росса. Установлено, что положение точки, где соотношение количества влаги, прошедшего вертикально сквозь барьер к количеству поступившей равно 0.5, что точно совпадает с решением для заданных условий $L = 32.6$ м (пересечение сплошной и пунктирной линий на рис 1).

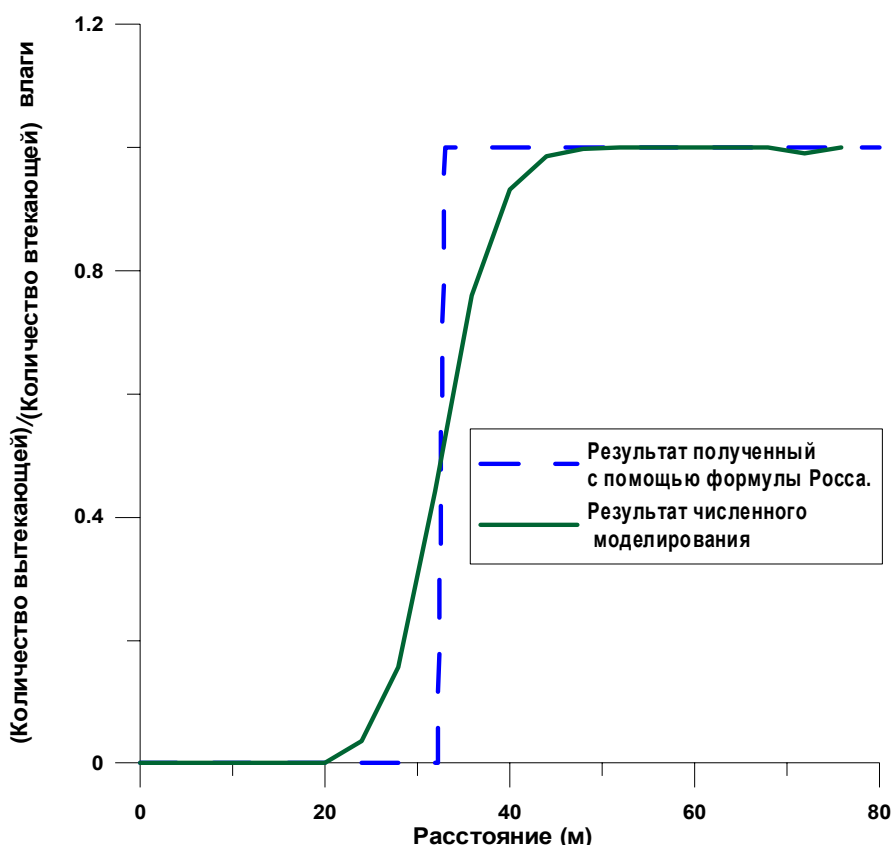


Рис.1. Сравнение численных результатов с результатами, полученными по формуле Росса

Проведенные численные эксперименты доказали формирование капиллярного барьера и показали хорошее совпадение с аналитической формулой Росса. Это позволяет считать, что модель была разработана верно и может быть использована для расчетов капиллярных барьеров.

В девятом параграфе второй главы приведена постановка задачи о двумерном взаимодействии скважина-пласт с учетом инерции² (задача №9), для которой была проведена апробация модели на фактических данных и представлены результаты апробации. Приведено описание экспериментальной установки и результатов эксперимента – скорости движения столба жидкости в скважине, которые описаны в работе Э.Грикевича³. Для сопоставлений расчетов для модели, учитывающей инерцию и не учитывающей инерцию были выполнены тестовые расчеты для 4 сценариев откачки из одиночной скважины с одинаковым дебитом для двух значений коэффициентов фильтрации ($K=20\text{м/сут}$ и $K=200\text{м/сут}$) с учетом инерции и без

² Здесь под инерцией подразумевается наличие столба воды в скважине с ненулевой массой.

³ Э.А. Грикевич. Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. – ВНИИМОРГЕО, Рига, 1969

инерции (см. таблицу 2). Значения остальных параметров модели были выбраны следующими: $\mu = 0.02$, $r_s = 0.02$ м, $m = 6$ м, $h_0 = 12.0$ м, $Q = -800$ м³/сут.

Таблица 2. Расчетные понижения и удельные дебиты для тестовых сценариев 1-4

	1, с учетом инерции K=20м/сут	2, без инерции K=20м/сут	3, с учетом инерции K=200м/сут	4, без инерции K=200м/сут
Понижение S (м)	5.6	3.4	2.1	0.4
Удельный дебит, $q_{yg} = Q/S$ (м²/сут)	142.8	253.3	381.0	2000.0

Глядя на таблицу 2, следует отметить существенное уменьшение удельных дебитов при учете инерционных эффектов. Вертикальное распределение притока к фильтру скважины позволяет выявить наиболее нагруженную область фильтра. Как видно из рис. 2, 3 - это верхние 2 метра фильтровой части скважины. Нижняя часть фильтра при этом испытывает малую нагрузку. Исходя из этого, можно сделать вывод, что независимо от длины фильтра при откачке или закачке наиболее нагруженной частью (рабочей) является только определенная зона фильтра. Значительное снижение удельного дебита скважины при учете динамических эффектов в стволе скважины требует использования скорректированных моделей при подборе водоподъемного оборудования, выборе конструкции скважин и при выполнении гидравлических расчетов скважинных водозаборов.

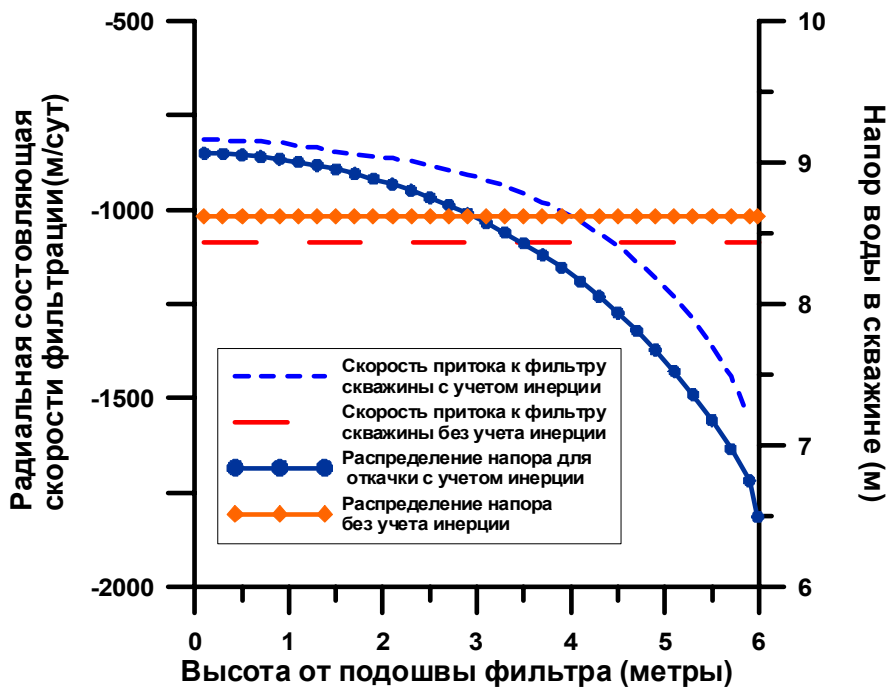


Рис. 2. Распределение по вертикали радиальных скоростей фильтрации и напоров на границе фильтра для сценариев 1 и 2 ($K=20 \text{ м/сут}$)

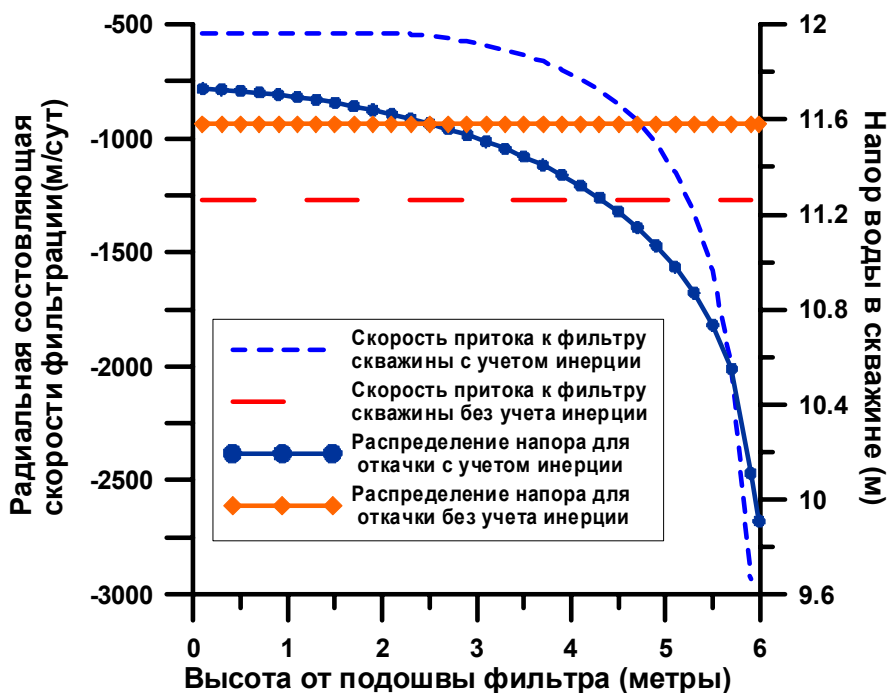


Рис. 3. Распределение по вертикали радиальных скоростей фильтрации и напоров на границе фильтра для сценариев 3 и 4 ($K=200 \text{ м/сут}$)

Оценке чувствительности одномерной модели экспресс-налива к параметрам, основанной на конечно-разностной постановке уравнения (2) уделено внимание в последней части второй главы. В качестве входных параметров для анализа чувствительности были выбраны основные - K, μ, ξ, r_s, H_0 - коэффициент фильтрации, водоотдача, сопротивление прискважинной зоны или скин-эффект, радиус фильтра и начальный напор (начальное возмущение уровня воды в скважине). Были получены кривые с относительными значениями чувствительности параметров K, μ, ξ, r_s, H_0 , корреляции параметров друг с другом и зависимость относительной ошибки определения параметров μ, K, ξ в зависимости от начального возмущения H_0 .

Третья глава начинается с обзора полевых экспериментов по опробованию скважин. Приведены такие методы, как опережающее опробование водоносных пластов, расходомерия. Описан принцип опробования скважин с помощью пластоиспытателей, эксперимент по оценке скорости притоков к скважинам Грикевича, испытание скважины с помощью экспресс-налива, выполненное Шержуковым⁴, а также другие эксперименты.

Недостатками аналитических методов определения параметров пласта являются, во-первых, использование лишь линеаризованных моделей (это ограничение связано с используемыми методами построения аналитических решений) и, во-вторых, сложность интерпретации результатов по трехпараметрическому аналитическому решению. Поэтому, в качестве альтернативы аналитическим методам предлагается программный подход по определению параметров, основанный на численных методах.

В тринадцатом параграфе третьей главы приведено описание программы SLUGD по определению параметров водоносного пласта - коэффициента фильтрации, водоотдачи (K, μ) и сопротивления прискважинной зоны (ξ) по набору экспериментальных данных на основе решения задачи об оптимальном управлении.

В связи с необходимостью визуально наблюдать за процессом поиска параметров и пользоваться интерактивным режимом подготовки и загрузки входных данных, была предложена модификация программы SLUGD – программа SLUG. Программа SLUG была разработана в среде MSDEV 4.0 с помощью графической библиотеки MFC. Также как и в программе SLUGD, в программе SLUG для численных расчетов задействован «солвер» DUMKA.

⁴ Б.С Шержуков, В.С.Алексеев, А.Д.Курманенко Рекомендации по определению параметров горных пород и грунтов методом экспресс-налива в несовершенные скважины. -ВНИИ ВОДГЕО, 1979

Поиск параметров в программе SLUG производится вручную. Двигая один из «слайдеров», (стандартный контроль MS Windows), отвечающих одному из параметров K , μ , ξ варьируется численное значение соответствующего параметра (см. рис. 4) в заданном диапазоне (см. рис. 5).

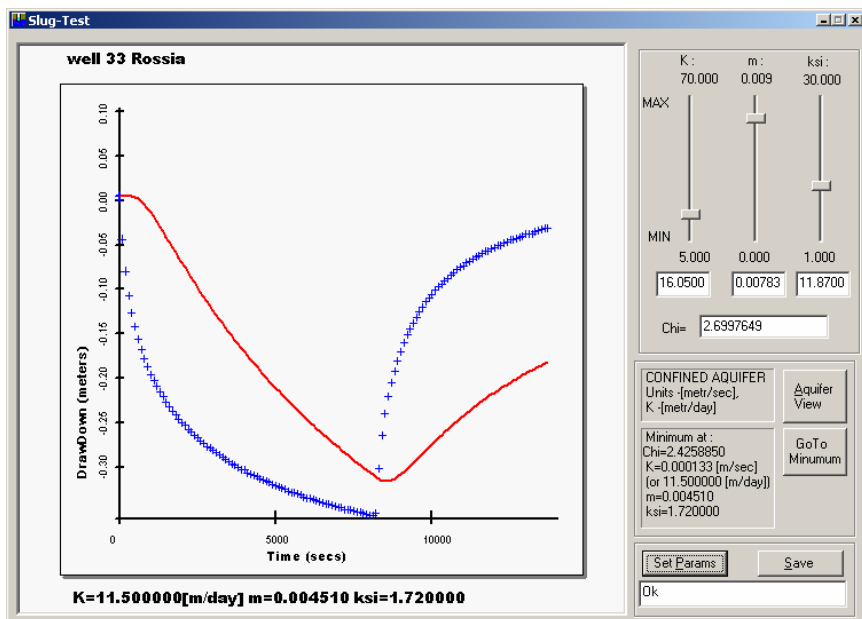


Рис. 4 Главное окно программы SLUG – поиск параметров (прерывистая кривая – фактические данные, сплошная – модельные)

Рис. 5 Окна ввода основных и дополнительных параметров программы SLUG

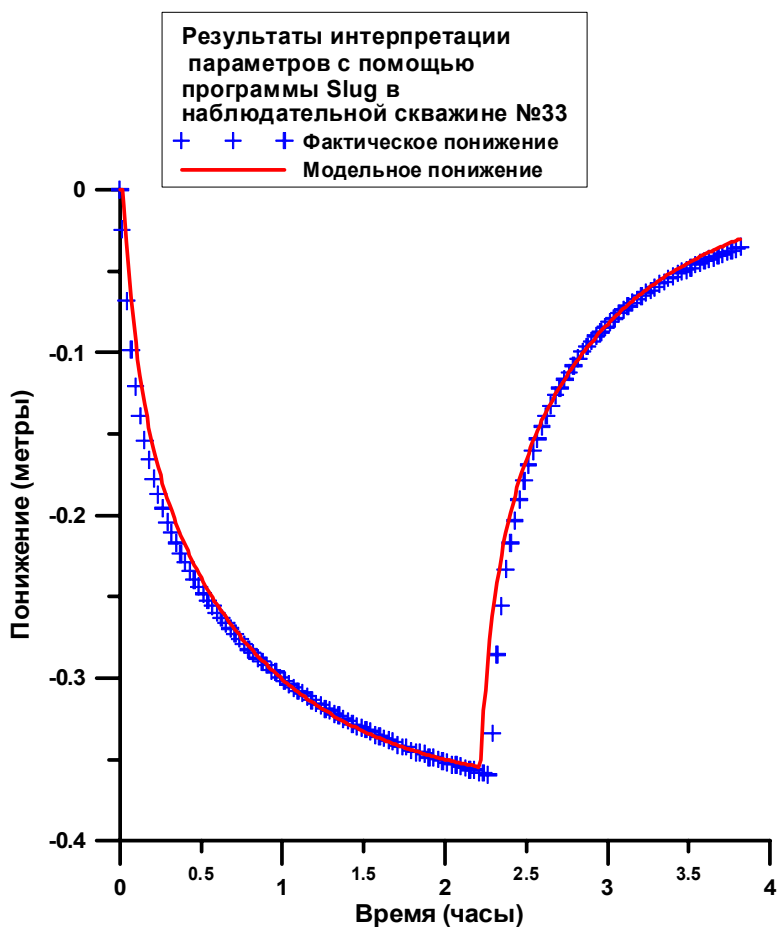


Рис. 6 Результаты интерпретации эксперимента с откачкой и восстановлением

Экспериментальные данные подстегиваются в виде текстового файла содержащего два столбца. Первый столбец – время, второй – напор или понижение. Формат столбца со временем либо абсолютный «час:мин:сек» (формат «даталоггера»), либо относительный (в секундах или минутах или часах или днях; единицы измерения также задаются в окне ввода) с момента начала эксперимента. Кроме того, окно ввода параметров позволяет задавать геометрию скважин: радиус фильтра, радиус скважины, свойства водоносного горизонта (напорный, безнапорный), начальный напор в пласте, начальное возмущение напора воды в скважине (для экспериментов по экспресс-наливу), дебит и длительность откачки (для экспериментов с откачкой). Пример результатов интерпретации эксперимента с откачкой и восстановлением приведен на рис. 6.

В параграфе 18 третьей главы приведено описание одной из площадок, для которой были получены по результатам интерпретации экспресс-наливов значения коэффициентов фильтрации.

На территории РНЦ «Курчатовский институт» имеется сеть наблюдательных скважин, пробуренных для проведения режимных наблюдений за состоянием подземных вод на площадке временных хранилищ радиоактивных отходов (ВХРАО) [6]. В 17 скважинах (12 на верхний, надморенный водоносный горизонт и 5 на нижний, надъюрский) в апреле 2005 года были проведены серии опытных работ –экспресс-наливов. По результатам экспресс-наливов среднее значение коэффициента фильтрации в верхнем надморенном водоносном горизонте имеет значение 4.4 м/сут , а в нижнем надъюрском - 3.8 м/сут . Карта распределения значений коэффициентов фильтрации на площадке ВХРАО и прилегающей территории приведена на рис. 7.

Для сопоставления по результатам интерпретации экспресс-наливов были использованы результаты опытных откачек, проведенных ранее на площадке ВХРАО Б.С.Шержуковым. Им были получены средние значения коэффициентов фильтрации для верхнего и нижнего водоносных горизонтов 4.2 м/сут и 2.2 м/сут .

Полученные значения коэффициентов фильтрации по результатам интерпретации экспресс-наливов с помощью программы SLUG были задействованы при проведении геофильтрационного моделирования площадки ВХРАО.

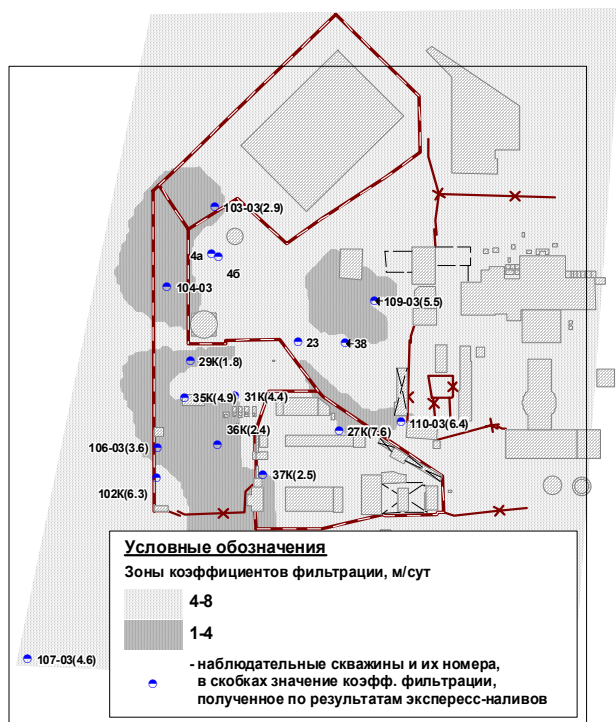


Рис. 7 Карта значений коэффициентов фильтрации на площадке ВХРАО РНЦ «Курчатовский институт».

Выводы.

Основными результатами диссертационной работы, включающей проведение теоретических, полевых и численных экспериментов, является следующее.

- Впервые выведены уравнения двумерной модели взаимодействия скважина-пласт с учетом эффектов инерции, при помощи которых получена оценка характера распространения возмущения, вызванного наливом и откачкой из скважины, в зависимости от глубины от подошвы фильтра.
- С помощью алгоритма DUMKA получены решения задач насыщенной-ненасыщенной фильтрации жидкости в пористой среде. Решена задача о протекании капиллярных барьеров. Алгоритм DUMKA использовался как «солвер» для модели экспресс-налива, а также для решения задачи о взаимодействии скважина-пласт с учетом инерции.
- Создана оригинальная компьютерная программа SLUG, которая позволяет определять значения параметров водоносного пласта - коэффициента фильтрации, параметра водоотдачи, а также и сопротивления прискважинной зоны. Программа использует экспериментальные данные, получаемые при проведении экспресс-наливов в скважинах. Для интерпретации этих данных в программе SLUG задействована численная модель экспресс-налива. Программа SLUG была использована при проведении экспериментов по опробованию наблюдательных скважин на территории площадки временных хранилищ радиоактивных отходов РНЦ «Курчатовский институт». Полученные результаты хорошо согласуются с результатами интерпретации проводимых ранее кустовых откачек.
- Созданные в рамках диссертационной работы новые программные средства, реализующие алгоритм DUMKA, демонстрируют высокую скорость и надежность при решении задач фильтрации подземных вод в пористой среде. Результаты исследований открывают перспективы улучшения и математического и программного обеспечения для решения геофильтрационных задач с применением указанного алгоритма в качестве «солвера».

Литература.

1. И.А. Расторгуев. Расчет уравнений фильтрации устойчивыми явными методами. Труды математического института имени Н.И. Лобачевского. Том 13. Материалы всероссийской молодежной научной школы-конференции. Казань, 19-23 ноября 2001г
2. И.А. Расторгуев. Моделирование уравнений фильтрации устойчивыми явными методами. Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания. Международная конференция. Обнинск, 14-18 мая 2002г
3. В.И. Лебедев И.А. Расторгуев. Расчет уравнений фильтрации устойчивыми явными методами. Тезисы докладов IX Всероссийского совещания по проблемам построения сеток для решения задач математической физики, посвященного памяти А.Ф. Сидорова. Дюрсо. 15-17 сентября 2002 г
4. И.А. Расторгуев, А.В. Расторгуев. Определение параметров безнапорных водоносных горизонтов с помощью экспресс-наливов в скважины. Инженерные изыскания в XXI веке. Материалы научно-производственной конференции. ПНИИС. Москва 2003
5. А.В. Лапин, И.А. Расторгуев. Решение задачи об экспресс-наливе методами оптимального управления. Труды математического центра имени Н.И. Лобачевского. Том 26. Материалы всероссийской молодежной научной школы-конференции. Издательство казанского математического общества. Казань. Июнь 2004
6. A. Rastorguev, K. Buharin, V. Volkov, D. Tsurikov, Yu. Zverkov, I. Rastorguev, E. Volkova. Prognosis of radionuclid contamination spreading on the site of Temporary Waste Storage of RRC "Kurchatov Institute". Conference ECORAD2004. The scientific basis for environment protection against radioactivity. Aix-en-Provence, France. 6-10 september
7. I. Rastorguev, E. Volkova, E. Gorbunova. Evaluation of fractured aquifer bottom position according to groundwater level observation data in the region of underground nuclear explosion execution. International conference on Final Element Models, MODFLOW, and more: solving groundwater problems. Karlovy Vary, Czech Republic. 13-16 September 2004.

8. И.А. Расторгуев, Э.М. Горбунова. Определение трещиноватости водоносного горизонта в зоне подземного ядерного взрыва. –Материалы конференции «Урал атомный –Урал промышленный». Февраль, 2005 г
9. И.А. Расторгуев. Сравнение явных и неявных численных методов для расчетов задач фильтрации. – Материалы XI Всероссийской школы-семинара «Современные проблемы математического моделирования». Сентябрь, 2005 г
10. И.А. Расторгуев, Р.Х. Каримов. Численная модель эксперимента экспресс-налив с учетом инерции в скважине. Проблемы инженерной геозкологии. Сборник трудов. Выпуск 10. Москва 2005.
11. И.А. Расторгуев. Сравнение явных и неявных численных методов для расчетов задач фильтрации. // Вычислительные методы и программирование. 2006. Раздел 7. 185-189.
12. И.А. Расторгуев. Влияние инерционных эффектов на гидравлические характеристики скважин. Москва. Водоснабжение и санитарная техника. №7. 2006.

Автор диссертации выражает глубокую признательность своему научному руководителю, д.ф.-м.н. профессору В.И. Лебедеву, благодарит коллектив НИИ ВОДГЕО за постановки задач и внимание к работе, коллективы структурных подразделений РНЦ «Курчатовского института» - Институт Проблем Безопасного использования Ядерной Энергии и Научно-технологического Комплекса «Реабилитация» за оказанную помощь и полезные советы.