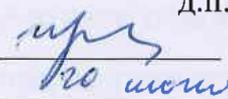


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК  
Кафедра программного обеспечения

ДОПУЩЕНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК  
И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ  
ЗАИМСТВОВАНИЯ

Заведующий кафедрой  
д.п.н., профессор

 И.Г. Захарова  
2016 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ ГАЗОВОДЯНОГО КОНТАКТА  
В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

02.04.03. Математическое обеспечение и администрирование информационных систем  
Магистерская программа «Высокопроизводительные вычислительные системы»

Выполнила работу  
Студентка 2 курса  
очной формы обучения



Кригина  
Марина  
Александровна

Научный руководитель  
к. физ.-мат. н., доцент



Ступников  
Андрей  
Анатольевич

Рецензент  
к. физ.-мат. н., доцент



Салтанова  
Татьяна  
Викторовна

Тюмень 2016

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор гидродинамических симуляторов .....	7
1.1. Симуляторы моделирования месторождений нефти и газа.....	7
1.1.1. TimeZYX.....	7
1.1.2. t-Navigator .....	8
1.1.3. Eclipse.....	10
1.1.4. Tempest.....	12
1.2. Структура DATA-файла данных для расчета гидродинамической модели в ECLIPSE.....	13
Глава 2. Математическая и алгоритмическая модели процесса настройки газоводяного контакта .....	15
2.1. Постановка задачи .....	15
2.2. Моделирование водоносных пластов в Eclipse .....	16
2.3. Исходные данные для алгоритма.....	18
2.4. Описание алгоритма .....	20
2.5. Определение наиболее эффективного метода подбора параметров ...	23
Глава 3. Описание программной реализации приложения для настройки газоводяного контакта .....	26
3.1. Требования к приложению .....	26
3.2. Реализация распараллеливания.....	28
3.3. Трехмерная визуализация с помощью OpenGL .....	30
3.4. Интерфейс приложения .....	31
Заключение .....	37
Список используемой литературы .....	38
Приложения .....	39

Приложение 1. Основные структуры.....	39
Приложение 2. Определение разниц между модельным и фактическим значениями подъема воды в столбцах модели.....	39
Приложение 3. Расчет множителей коэффициента притока.....	40

## Введение

В нефтегазовом инженерном деле под гидродинамической моделью (ГДМ) понимают объемную имитацию месторождения, хранящуюся в памяти компьютера в виде многомерного объекта, позволяющую исследовать и прогнозировать процессы, сопутствующие разработке месторождения.

Гидродинамическая модель месторождения является инструментом для исследования и решения следующих задач [7,6,5]:

- изучение закономерностей выработки запасов углеводородов;
- анализ эффективности применяемых технологий для увеличения нефтегазо-конденсато-отдачи пластов;
- обоснование основных параметров системы разработки;
- формирование вариантов разработки;
- прогноз технологических показателей разработки;
- решение оптимизационных задач по повышению эффективности производства.

Газоводяной контакт (ГВК) – это граница раздела свободного газа и воды в газовой залежи (рис. 1). Знание положения газоводяного контакта чрезвычайно важно при рассмотрении вопросов разработки газовых месторождений. От достоверности определения положения ГВК зависят точность подсчета запасов газа объемным методом и определение значения средневзвешенного давления в месторождении, а также определение направления продвижения контурных и подошвенных вод по залежи и к отдельным скважинам [3].

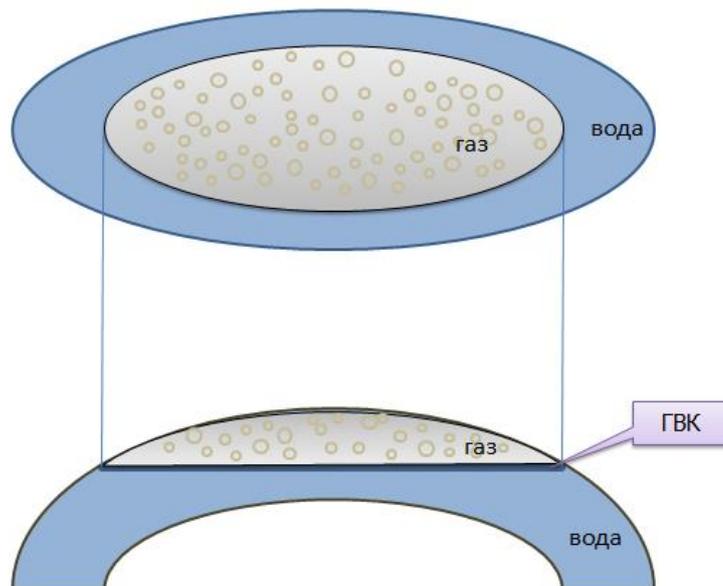


Рисунок 1. Газоводяной контакт

Симулятор обеспечивает построение решений систем уравнений, с помощью которых моделируются процессы. Для расчета положения ГВК симулятор Eclipse использует уравнения, где участвуют множители коэффициента притока, которые в модели определяют взаимодействие между подошвенной водой и ячейками, с которыми она соединяется, а также параметры водоносного пласта [2]. Для установления ГВК в каждом столбце ячеек модели в необходимое положение изменяют множители коэффициента притока.

Как правило, на практике при построении гидродинамической модели инженеры-проектировщики выполняли подбор интуитивно, руководствуясь анализом того, как ведет себя ГВК в каждом столбце ячеек при различных значениях множителей коэффициента притока. Однако представляется возможным автоматизировать данный процесс на основе математических методов подбора параметров. Это позволит освободить инженера от большей части работ при настройке газоводяного контакта, а также уменьшить число итераций, необходимых для поиска результата.

Таким образом, возникает задача подбора оптимальных параметров для настройки газоводяного контакта.

Необходимо, в рамках модели газоводяного контакта в симуляторе Eclipse, настроить параметры подъема воды в модели так, чтобы он был близок к фактическому.

Проблема настоящей работы – построение алгоритмов поиска оптимального решения задачи настройки газоводяного контакта.

Цель работы – разработать приложение для настройки газоводяного контакта в гидродинамической модели месторождения.

Объект исследования – настройка гидродинамической модели.

Предмет исследования – алгоритмы для настройки газоводяного контакта в ГДМ.

Задачи исследования:

1. Изучение и анализ литературы по вопросам гидродинамического моделирования, настройке моделей, алгоритмам вычислительной математики, разработке программных продуктов.
2. Разработка алгоритма для решения задачи настройки газоводяного контакта (методы вычислительной математики).
3. Разработка приложения для настройки газоводяного контакта.
4. Определение эффективного метода подбора параметров в разработанном алгоритме.

Для решения задачи используются методы вычислительной математики. Для повышения вычислительной производительности программного продукта использованы методы параллельной обработки данных.

Предполагаемые результаты – программа, осуществляющая подбор параметров для настройки газоводяного контакта.

## Глава 1. Обзор гидродинамических симуляторов

### 1.1. Симуляторы моделирования месторождений нефти и газа

Для создания гидродинамических моделей чаще всего используют программные продукты Eclipse (Schlumberger), Tempest (Rohar), VIP (Landmark), TimeZYX (группа компаний «Траст»). В последние годы стала продвигаться отечественная программа t-Navigator (RF Dinamics) [4].

#### 1.1.1. TimeZYX

Программный комплекс «TimeZYX» является развитием проекта по созданию программного комплекса «ТРАСТ».

Алгоритмы для персональных и суперкомпьютеров, реализованные в ПК «TimeZYX», позволяют производить распределенные расчеты достаточно эффективно.

Востребованными функциями ПК «TimeZYX» являются: моделирование сложных месторождений с разномасштабной трещиноватостью, гигантских месторождений (содержащих более 1 млрд. ячеек), секторное моделирование и осуществление оптимального размещения скважин и боковых стволов (в том числе с горизонтальным окончанием), автоэкспертиза и автосравнение моделей.

Для обеспечения преемственности работ есть возможность перевода моделей в формат, который используется в «TimeZYX», из других программных продуктов, выгрузки результатов моделирования не только в форматах TimeZYX, но и в других форматах (Schlumberger или Rohar).

В состав комплекса TimeZYX входят следующие элементы:

- Геология – модуль геологического моделирования, предназначенный для создания и редактирования 2D- и 3D-геологических моделей, их первичного анализа, построения карт и подсчета запасов в соответствии с определенными требованиями.
- Ремасштабирование – программный блок, предназначенный для перехода от геологической к гидродинамической модели.

- Гидродинамика – блок, использующийся для создания, редактирования и адаптации гидродинамических моделей, проведения расчетов прогнозных вариантов, визуализации результатов расчета.
- Оптимизация и анализ – блок, производящий мониторинг и анализ, предназначен для анализа результатов гидродинамических расчетов, расчета эффективности использования месторождения и экономических показателей разработки, а также для составления различных таблиц и отчетов.

Гидродинамический симулятор МКТ – проблемно-ориентированный симулятор для создания постоянно действующих геолого-технологических моделей и моделирования процессов фильтрации в гигантских месторождениях сложной структуры. Важная особенность симулятора – это возможность создавать такую конфигурацию программы на основе наборов модулей, которая может позволить эффективно решать задачи повышенной сложности, недоступные другим программам. Благодаря использованию многомасштабных многосеточных алгоритмов можно реализовать переход от расчета на гидродинамической сетке к расчету на подробной сетке (down-scaling) в каких-либо отдельных ячейках, при этом в остальной области расчет производится на исходной гидродинамической сетке для сокращения времени.

Использование возможностей симулятора МКТ позволяет сократить объем обрабатываемых данных и увеличить скорость загрузки модели. Гидродинамический симулятор МКТ имеет версию для кластерных комплексов и систем с общей памятью, что позволяет проводить вычисления, требующие много ресурсов, за приемлемое время.

### 1.1.2. t-Navigator

Программный комплекс t-Navigator может работать с входными данными в форматах ECLIPSE компании Schlumberger, IMEX и STARS компании CMG и Tempest MORE компании ROXAR. Могут быть созданы

файлы с результатами расчетов, совместимые с Eclipse, такие как .EGRID, .INIT, .UNSMRY, .UNRST, .SMSPEC.

Архитектура данного программного комплекса была реализована так, чтобы большинство операций могло быть произведено через графический интерфейс, что позволяет экономить огромное количество времени, затрачиваемого на адаптацию моделей и подбор оптимальных вариантов разработки месторождений. Графический интерфейс t-Navigator довольно простой, он позволяет инженерам-разработчикам очень быстро освоить необходимый инструментарий.

На сегодняшний день, данный программный комплекс позволяет решать следующие задачи:

- 1) создание прогнозной версии модели для последующего планирования разработки месторождений;
- 2) оценка эффективности гидравлического разрыва пласта;
- 3) выбор оптимального варианта для бурения боковых стволов;
- 4) оценка эффективности обработки призабойной зоны пласта кислотами и растворами поверхностно-активных веществ (пав);
- 5) расстановка скважин по заданной схеме разработки;
- 6) оценка эффективности заводнения пластов;
- 7) выбор оптимальной схемы закачки.

В процессе расчета модели инженер имеет доступ к двумерным и трехмерным картам рассчитанных параметров, графикам по скважинам, секторным диаграммам, графиками распределения добычи или закачки по интервалам перфорации каждой скважины.

Все элементы работы с интерактивной визуализацией и аналитическими инструментами могут быть экспортированы в различных форматах для использования в отчетах и презентациях. Также предусмотрена выгрузка таблиц в формате «Госплана».

Есть функция выбора наиболее эффективного способа расстановки скважин путем расчета и анализа различных вариантов. Для оценки

экономической неопределённости, связанной с выбором той или иной схемы разработки, добывающие и нагнетательные скважины расставляются случайным образом по методу Монте-Карло.

t-Navigator позволяет элементарно просто на любом шаге расчета вводить в эксплуатацию вертикальные и горизонтальные скважины. Можно создавать и сохранять произвольные конфигурации добывающих и нагнетательных скважин.

### 1.1.3. Eclipse

Семейство симуляторов ECLIPSE предоставляет наиболее полный набор решений для численного моделирования динамического поведения всех типов коллекторов, флюидов, степеней структурной и геологической сложности и систем разработки. ECLIPSE выполняет все задачи моделирования пласта, включая конечно-разностные модели для черной нефти, сухого газа, композиционного состава газоконденсата, термодинамические модели тяжелой нефти и модели линий тока.

Для создания гидродинамических моделей специалисты чаще всего используют симулятор ECLIPSE Blackoil Simulation. ECLIPSE Blackoil является универсальным симулятором нелетучей нефти, который использует полностью неявную схему моделирования фильтрации для трехмерных задач. В модели нелетучей нефти предполагается, что флюид состоит из пластовой нефти, растворенного газа и воды. Также предполагается, что пластовая нефть и растворенный газ могут смешиваться в любых пропорциях.

Пре- и пост-процессоры Eclipse предлагают пользователям полный набор приложений для изучения месторождений методом гидродинамического моделирования. Пре-процессоры включают модули FloGrid, Schedule, SCAL, VFPi b PVTi. К пост-процессорам относятся GRAF и FloViz. SimOpt, который используется для пре- и пост-процессинга, помогает специалистам проводить сопоставление фактических и моделируемых данных

добычи. Все вместе или независимо данные приложения функционируют совместно с симуляторами Eclipse.

- FloGeo. Опция комплекса FloGrid используется для выполнения многофазного, укрупнения свойств на сетке.
- FloViz. Трехмерная визуализация исходных данных и результатов моделирования.
- PVTi. Давление-объем-температура – создание и настройка модели флюида (композиционное моделирование), моделирование лабораторных экспериментов.
- SCAL. Работа с лабораторными результатами по анализу керна – кривые ОФП, капиллярных давлений. Сглаживание, группирование, нормализация кривых ОФП.
- Schedule. Подготовка промысловых данных для гидродинамического моделирования
- SimOpt. Анализ чувствительности параметров для ускорения процесса воспроизведения истории. Полуавтоматическая адаптация модели.
- ECLIPSE FloGrid. Программный комплекс ECLIPSE FloGrid предлагает уникальный набор геологических и гидродинамических инструментов, который позволяет решать сложные задачи описания месторождения для точного прогноза дебитов скважин. Приложение ECLIPSE FloGrid разработано для поддержки соответствия между геологической и гидродинамической моделями.

Программы пре- и постпроцессинга генерируют входные данные для моделирования, а ECLIPSE Office помогает объединить различную информацию в единый набор данных для просчета в ECLIPSE. Программы пост-процессинга позволяют визуализировать выходные данные симуляторов ECLIPSE и манипулировать ими.

#### 1.1.4. Tempest

Поддерживая широкий набор гибких форматов входных данных, комплекс TEMPEST в целом и каждый из его модулей в отдельности легко интегрируются с решениями, основанными как на продуктах Roxar, так и на продуктах других фирм.

В состав TEMPEST входят следующие модули:

- TEMPESTView - интерактивная система 3D/2D визуализации, анализа и подготовки данных, а также управления ими. TEMPESTView является интеграционным ядром комплекса TEMPEST.
- TEMPESTMORE - представляет собой универсальный трехфазный трехмерный пакет гидродинамического моделирования нефтяных, нефтегазовых и газоконденсатных месторождений. Наличие двух совместимых между собой гидродинамических моделей (нелетучей нефти - Black Oil и композиционной — EOS) позволяет эффективно решать как простые, так и очень сложные с точки зрения фазовых превращений проблемы и легко переключаться между композиционным моделированием и моделью нелетучей нефти.
- TEMPESTNextwell - интерактивная система моделирования течения жидкости в пласте с улучшенным обчетом призабойной зоны и ствола скважины. Предназначена для моделирования и оптимизации разработки месторождений с наклонно-направленными и горизонтальными скважинами.
- TEMPESTPVTx - интерактивная система моделирования PVT свойств пластовых флюидов и подготовки PVT данных для трёхмерного гидродинамического моделирования.
- TEMPESTVenture - позволяет проводить оценку и сравнительный анализ экономической эффективности для проектируемого или уже осуществляемого варианта разработки, а также для отдельных технологических мероприятий.

- TEMPESTLift - модуль расчета гидравлики в стволе скважины для получения многомерных таблиц, связывающих забойное и устьевое давление в скважине при разных дебитах, значениях обводненности и газовых факторах.

Для применения в данной работе использован симулятор Eclipse. Он предоставляет наиболее полный и надежный набор решений для численного гидродинамического моделирования. Также он характеризуется хорошей скоростью вычислений, наличием понятного руководства пользователя и технического описания, содержащего информацию о том, как реализовано моделирование в симуляторе.

## 1.2. Структура DATA-файла данных для расчета гидродинамической модели в ECLIPSE

Файл исходных данных симулятора ECLIPSE разделен на разделы, каждый из которых начинается с ключевого слова [1].

- RUNSPEC. Содержит заголовок, параметры решаемой проблемы, переключатели, имеющиеся фазы и т. д.
- GRID. Данный раздел содержит описание геометрии используемой сетки и свойств породы (пористости, абсолютной проницаемости и т. д.) для каждого блока сетки.
- EDIT. В этом разделе указывается информация о коррекции поровых объемов, о глубинах центров сеточных блоков и проводимостей.
- PROPS. Раздел содержит описание таблиц свойств породы и пластовых флюидов как функции давления, насыщенности и состава (плотности, вязкости, относительные проницаемости, капиллярные давления и др.)
- REGIONS. В этом разделе производится деление используемой сетки на области для задания и вычисления: свойств PVT (плотностей и вязкостей флюидов), свойств, являющихся функциями насыщенности (относительные проницаемости и капиллярные давления), начальных

условий (распределений давлений и насыщенностей в условиях капиллярно гравитационного равновесия), запасов флюидов (запасов по областям и перетоков между ними)

- **SOLUTION.** Содержит начальные условия в пласте, которые могут быть заданы путем: вычисления равновесного состояния на основе задания положения контактов между флюидами, ввода данных из Restart файла, созданного в результате предыдущего расчета, задания значений для каждого блока сетки.
- **SUMMARY.** Здесь задается список данных, подлежащих записи в Summary файл после каждого временного шага. Этот раздел необходим, если на основе результатов расчетов будут строиться графические зависимости.
- **SCHEDULE.** Раздел содержит описание моделируемых операций (управление добычей и нагнетанием, ограничения) и моменты времени, для которых необходимо выводить результаты расчетов. В этом разделе также могут быть заданы кривые, описывающие вертикальное течение в стволах скважин, и параметры настройки программы.

В каждом разделе присутствуют свои ключевые слова, информацию о использовании которых можно найти в руководстве пользователя Eclipse.

## Глава 2. Математическая и алгоритмическая модели процесса настройки газоводяного контакта

### 2.1. Постановка задачи

Дана гидродинамическая модель месторождения – объемная имитация месторождения (рис.2), представленная трехмерной сеткой из ячеек  $\{a_{ijk}\}$ , содержащих значения различных параметров ( $a_b(i, j, k)$  – b-ый параметр в ячейке с индексами  $i, j, k$ ), включая водонасыщенность, и имеющих координаты  $x, y, z$ . В каждом столбце ячеек (при фиксированных  $i, j$ ) определяется множитель коэффициента притока, влияющий на процесс изменения водонасыщенности.

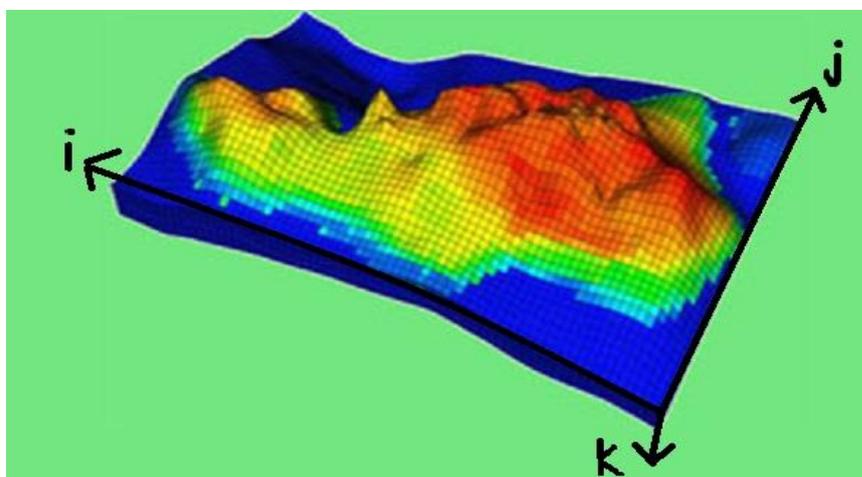


Рисунок 2. Гидродинамическая модель месторождения

Также в модели присутствуют скважины, заданные координатами  $x_s, y_s$  и значением давления  $P_s$ . Кроме того, имеется двухмерная карта из ячеек, содержащих значения фактических подъемов воды и имеющих координаты  $x_f, y_f$ .

При изменении множителя коэффициента притока в каком-либо столбце ячеек (при фиксированных  $i, j$ ), в результате расчета, произведенного с помощью симулятора Eclipse, изменяются значения водонасыщенности  $swat$  в ячейках этого столбца. Ячейка  $a_{i,j,k^*}$ , в которой проходит ГВК в столбце  $ij$ , определяется по значениям водонасыщенности на последнюю дату расчетного периода:  $a_{swat}(i, j, k^*) < A, a_{swat}(i, j, k^* + 1) \geq A$  ( $A$  – значение водонасыщенности, обозначающее границу между водой и газом). Таким

образом, для установления ГВК в каждом столбце ячеек модели в необходимом положении нужно подбирать множители коэффициента притока.

Необходимо, используя множители коэффициента притока водоносного пласта, настроить подъем воды в модели так, чтобы он был близок к фактическому. После такой настройки в результате расчета в Eclipse будут получены значения давлений в каждой из скважин, отличных от изначальных, принимаемых в качестве верных. Таким образом, необходима внешняя настройка: изменение параметров водоносных пластов так, чтобы при настроенном подъеме воды давление в скважинах было близко к исходному.

## 2.2. Моделирование водоносных пластов в Eclipse

Расчет в Eclipse выполняется в соответствии с моделью водоносных пластов Фетковича [2], использующей подход, основанный на псевдоустановившемся индексе продуктивности и материальном балансе между давлением водоносного пласта и совокупным притоком.

В модели Фетковича предполагается, что отклик давления ощущается равномерно во всем водоносном пласте.

Скорость притока водоносного пласта описывается уравнением:

$$Q_{ai} = \frac{d}{dt}(W_{ai}) = J a_i [p_a - p_i + \rho g(d_i - d_a)], \quad (1)$$

где  $Q_{ai}$  – скорость притока из водоносного пласта в присоединенный блок сетки  $i$ ;

$W_{ai}$  – совокупный приток из водоносного пласта в присоединенный блок сетки  $i$ ;

$J$  – заданный индекс продуктивности водоносного пласта;

$a_i$  – часть области, соединяющаяся с блоком сетки  $i$ ;

$p_a$  – давление в водоносном пласте в момент времени  $t$ ;

$p_i$  – давление воды в присоединенном блоке сетки  $i$ ;

$\rho$  – плотность воды в водоносном пласте;

$d_i$  – глубина блока сетки;

$d_a$  – заданная глубина водоносного пласта.

Часть области для каждого соединения с блоком сетки дается следующим соотношением:

$$a_i = \frac{m_i A_i}{\sum m_i A_i}, \quad (2)$$

где  $A_i$  – площадь грани блока, соединяющегося с водоносным пластом;

$m_i$  – множитель коэффициента притока водоносного пласта.

Отклик давления в водоносном пласте описывается уравнением материального баланса

$$W_a = C_t V_{w0} (p_{a0} - p_a), \quad (3)$$

где  $W_a$  – совокупный приток из водоносного пласта;

$C_t$  – полная (порода+вода) сжимаемость водоносного пласта;

$V_{w0}$  – начальный объем в водоносном пласте;

$p_{a0}$  – начальное давление воды в водоносном пласте.

Поведение водоносного пласта зависит от двух параметров: постоянной времени и индекса продуктивности. Постоянная времени водоносного пласта описывается выражением:

$$T_c = \frac{C_t V_{w0}}{J} \quad (4)$$

В предположении об однородности давления в залежи в присоединенных блоках сетки, при интегрировании уравнений 1 и 3 средняя скорость притока на интервале времени выражается следующей формулой:

$$\bar{Q}_{ai} = a_i J (p_a - p_i + \rho g (d_i - d_a)) \left( \frac{1 - \exp(-\frac{\Delta t}{T_c})}{\frac{\Delta t}{T_c}} \right) \quad (5)$$

Эта формула используется для расчета скоростей притока.

В конце каждого шага по времени полный накопленный приток водоносного пласта увеличивается, а его давление пересчитывается с помощью формулы 3.

Параметры водоносного пласта (сжимаемость, пористость, индекс продуктивности и т.п.) задаются с помощью ключевого слова AQUFETP, а

соединения водоносного пласта с одной или несколькими гранями пласта задаются с помощью ключевого слова AQUANCON.

### 2.3. Исходные данные для алгоритма

Исходные данные о модели, описанные в пункте 2.1, содержатся в заглавном файле специального формата, имеющего расширение .DATA. Eclipse работает с этим файлом, а также с файлами, имена которых записаны в нем после ключевого слова INCLUDE. Также заглавный файл имеет информационные блоки, отмеченные ключевыми словами, содержащие различные параметры модели и расчета [1]. Для алгоритма важны информационные блоки, отмеченные следующими ключевыми словами:

- AQUDIMS – задает число водоносных пластов модели и число строк при описании соединений модели водоносного пласта с залежью (число строк после ключевого слова AQUANCON).
- AQUFETP – имеет следующие параметры:
  - номер водоносного пласта,
  - опорная глубина,
  - начальное давление в водоносном пласте на опорной глубине,
  - начальный объем воды в водоносном пласте,
  - общая (порода+вода) сжимаемость водоносного пласта,
  - коэффициент продуктивности водоносного пласта,
  - номер таблицы для свойств водной фазы, зависящих от давления,
  - начальная концентрация солей в водоносном пласте,
  - температура в водоносном пласте.

Все параметры кроме начального объема воды, сжимаемости и коэффициента продуктивности заранее известны.

После ключевого слова AQUFETP и его параметров находится запись с ключевым словом INCLUDE и именем файла, который содержит ключевое слово AQUANCON, задающее список блоков ячеек, определяемых нижними и верхними значениями координат  $i$ ,  $j$ ,  $k$ . С помощью этого списка

устанавливается связь водоносной модели с залежью. В данном случае каждый блок состоит из одной ячейки. Помимо координат каждая запись содержит номер водоносного пласта, к которому относится; индекс, определяющий грань залежи, с которой связан водоносный пласт (в данном случае K+); коэффициент притока водоносного пласта; множитель коэффициента притока водоносного пласта.

Координаты ячеек модели, записанные битовыми строками, и значения активности ячеек (0 или 1) хранятся в отдельном файле с расширением .GRID.

Кроме того, в отдельном текстовом файле записаны значения координат скважин.

Давление в скважинах на каждую дату хранится в файле с расширением .RSM под ключевым словом WBP.

Фактические значения координат подъема воды хранятся в файле формата .cpr-3.

Пользователь помимо данных, загружаемых из файлов, должен задать указанные параметры алгоритма:

- Начальное значение множителей коэффициента притока.
- Значение водонасыщенности для обводненных ячеек – определяет границу между водой и газом.
- Шаг разбиения на регионы, на которые будут делиться ячейки в ходе процесса.
- Условие окончания процесса: минимальная допустимая разница в подъемах воды в каждой скважине.
- Через сколько итераций, не приводящих к изменению модельного подъема воды в конкретной скважине, нужно прекратить настройку скважины.
- Условие окончания внешнего процесса: минимальная допустимая разница в давлениях в каждой скважине.

- Версия Eclipse для того, чтобы пользователь мог выбрать для запуска программой ту версию, которая у него установлена на компьютере.
- Количество потоков распараллеливания.
- Число водоносных пластов и их параметры. Распределение ячеек по пластам можно считать из файла, который выбирает пользователь и который содержит записи AQUANCON. Начальный объем воды в каждом водоносном пласте можно примерно рассчитать заранее. Для этого подключаются файлы SATNUM.grdecl, faz.inc, .INIT.

#### 2.4. Описание алгоритма

Входными для алгоритма являются следующие данные:

- 1) Гидродинамическая модель месторождения, представленная трехмерной сеткой из ячеек  $\{a_{ijk}\}$ .

$a_b(i, j, k)$  – b-ый параметр в ячейке с индексами i, j, k.

$x=x(i), y=y(j), z=z(k)$  – координаты каждого угла ячейки  $a_{ijk}$ .

- 2)  $S = \{x_s, y_s, P_s^0\}$  – скважины, заданные координатами  $x_s, y_s$  и значением давления  $P_s^0$ .

- 3)  $w_f$  – фактический подъем воды в точках  $(x_f, y_f)$ .

$$\text{Шаг 1. } KP_{ij}^1 = KP^0, \quad (6)$$

где  $KP_{ij}^q$  – множитель коэффициента притока в столбце ячеек при фиксированных i, j на итерации q,  $KP^0$  – начальное значение множителя коэффициента притока, заданное пользователем.

Шаг 2. В результате расчета Eclipse формирует набор файлов на каждую из дат расчетного периода, содержащих в частности значения водонасыщенности для каждой ячейки.

Шаг 3. Ячейка  $a_{i,j,k^*}$ , в которой проходит ГВК в столбце ij, определяется по значениям водонасыщенности на последнюю дату расчетного периода:

$$a_{swat}(i, j, k^*) < A, a_{swat}(i, j, k^* + 1) \geq A, \quad (7)$$

где  $A$  – значение водонасыщенности, обозначающее границу между водой и газом.

$w_{ij}^q$  - координата  $z$  середины данной ячейки – модельный подъем воды в столбце  $ij$  на итерации  $q$ .

Шаг 4. В файле карты фактических значений подъема воды (в формате .cps-3 text) находится среднее из значений подъемов воды, попадающих в диапазон ячейки  $a_{i,j,k^*}$ .

$$w_{f(ij)} = \sum_n \frac{w_f}{n}, x_f \in x(i), y_f \in y(j) \quad (8)$$

Необходимо найти среднее из значений, потому что может быть несколько значений, попадающих в диапазон ячейки, т.к. координаты ячеек в модели и в карте не совпадают.

Шаг 5. В каждом столбце ячеек  $ij$  высчитывается разница между модельным и фактическим подъемом воды

$$\Delta w^q = w_{ij}^q - w_{f(ij)} \quad (9)$$

Шаг 6. В зависимости от  $\Delta w^q$  столбцы ячеек разделяются на регионы в соответствии с указанным пользователем шагом разбиения. Сохраняется карта регионов в формате .cps-3.

Шаг 7. Если  $|\Delta w^q| < \varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_1$  - заданное пользователем значение допустимой погрешности, или если  $\Delta w^q$  не меняется в течение количества итераций, которое задано пользователем, то настройка этого столбца заканчивается. Если остаются столбцы, которые нужно продолжать настраивать, то выполняется шаг 8, иначе – шаг 11.

Шаг 8. На каждой  $q$ -ой итерации значение множителя коэффициента притока ( $KP_{ij}^{q+1}$ ) для каждого столбца ячеек, для которого  $\Delta w^q > 0$ , определяется по закону линейной интерполяции:

$$KP_{ij}^{q+1} = KP_{ij}^q - \frac{(KP_{ij}^{q-1} - KP_{ij}^q) * \Delta w^q}{\Delta w^{q-1} - \Delta w^q}, \quad (10)$$

Если  $\Delta w^{q-1} = \Delta w^q$  или получилось, что  $KP_{ij}^{q+1} \leq 0$ , а также на первой итерации множитель высчитывается по формуле:

$$KP_{ij}^{q+1} = \frac{KP_{ij}^q}{2} \quad (11)$$

Множители необходимо определить так, чтобы выполнялось условие

$$\sum_{ij} KP_{ij}^{q+1} = \sum_{ij} KP_{ij}^q \quad (12)$$

Поэтому высчитывается значение, на которое изменились множители на данном шаге:

$$sum^q = \sum_{ij, \Delta w^q > 0} (KP_{ij}^{q+1} - KP_{ij}^q) \quad (13)$$

Шаг 9. Высчитывается значение, на которое нужно изменить множитель коэффициента притока, для тех столбцов ячеек, для которых  $\Delta w^q < 0$ :

$$\Delta KP_{ij}^{q+1} = KP_{ij}^q - KP_{ij}^{q+1}, \quad (14)$$

где  $KP_{ij}^{q+1}$  высчитывается по формуле 15 (на первой итерации или при  $\Delta w^{q-1} = \Delta w^q$ ) или 10 (в остальных случаях)

$$KP_{ij}^{q+1} = \frac{3 * KP_{ij}^q}{2} \quad (15)$$

Шаг 10. Значение множителя коэффициента притока ( $KP_{ij}^{q+1}$ ) для каждого столбца ячеек, для которого  $\Delta w^q < 0$ , определяется по формуле:

$$KP_{ij}^{q+1} = KP_{ij}^q - \frac{sum^q}{count^q} * \Delta KP_{ij}^{q+1}, \quad (16)$$

$$\text{где } count^q = \sum_{ij, \Delta w^q < 0} \Delta KP_{ij}^{q+1} \quad (17)$$

Осуществляется переход к шагу 2.

Шаг 11. Высчитывается разница модельного и фактического давления по всем скважинам:

$$\Delta P^r = \sum_S (P_S^r - P_S^0) \quad (18)$$

где r – номер итерации внешней настройки давлений в скважинах

Шаг 12. Если  $|\Delta P^r| < \varepsilon_2$ , где  $\varepsilon_2$  - заданное пользователем значение допустимой погрешности, то выполнение алгоритма заканчивается. Иначе выполняется следующий шаг.

Шаг 13. Изменение какого-либо из параметров водоносного пласта: коэффициента продуктивности, сжимаемости или начального объема воды. Выбор параметра происходит следующим образом. На первой итерации

изменяемый параметр - коэффициент продуктивности. На всех последующих итерациях если  $|\Delta P^r| > |\Delta P^{r-1}|$ , то изменяться будет другой параметр: если текущий изменяемый параметр – коэффициент продуктивности, то изменяемым параметром становится сжимаемость, если текущий изменяемый параметр – сжимаемость, то изменяемым параметром становится начальный объем воды в водоносном пласте. Данные параметры определяются по закону линейной интерполяции:

$$par^{r+1} = par^r - \frac{(par^{r-1} - par^r) * \Delta P^r}{\Delta P^{r-1} - \Delta P^r}, \quad (19)$$

где  $par^{r+1}$  – параметр на данной итерации.

Если  $\Delta P^{r-1} = \Delta P^r$  или получилось, что  $par^{r+1} \leq 0$ , а также на итерации  $r=1$  параметр высчитывается по формуле:

$$par^{r+1} = \frac{par^r}{2} \quad (20)$$

При этом при увеличении начального объема воды в водоносном пласте и сжимаемости давление в скважинах увеличивается, а при увеличении коэффициента продуктивности – уменьшается.

Осуществляется переход к шагу 1.

## 2.5. Определение наиболее эффективного метода подбора параметров

Для подбора параметров, которые влияют на расположение газовой контактной поверхности в модели, использовались следующие методы:

- 1) Линейная интерполяция. Предполагается, что зависимость между множителями коэффициента притока и разницей между фактическим и модельным подъемом воды – линейная. Тогда множитель для следующей итерации выражается следующим образом:

$$KP_{ij}^{q+1} = KP_{ij}^q - \frac{(KP_{ij}^{q-1} - KP_{ij}^q) * \Delta w^q}{\Delta w^{q-1} - \Delta w^q}, \quad (21)$$

где  $KP_{ij}^{q+1}$  – множитель коэффициента притока на данной итерации;

$\Delta w^q$  – разница между модельным и фактическим подъемом воды.

2) Интерполяция полиномом Лагранжа второго порядка с добавлением начала координат. Предполагается, что зависимость между множителями коэффициента притока и разностями между фактическим и модельным подъемом воды определена полиномом второй степени вида  $\Delta w = a * KP^2 + b * KP$ .

Для интерполяции взяты точки  $(KP_{ij}^{q-1}, \Delta w^{q-1}), (KP_{ij}^q, \Delta w^q), (0, 0)$ .

Полином Лагранжа выглядит следующим образом:

$$L(KP) = KP * \left( \frac{KP_{ij}^{q-1} * \Delta w^q (KP - KP_{ij}^{q-1}) - KP_{ij}^q * \Delta w^{q-1} * (KP - KP_{ij}^q)}{KP_{ij}^{q-1} * KP_{ij}^q * (KP_{ij}^q - KP_{ij}^{q-1})} \right) \quad (22)$$

Приравняв  $L(KP)$  к нулю, получим множитель коэффициента притока для следующей итерации:

$$KP_{ij}^{q+1} = \frac{(KP_{ij}^{q-1})^2 * \Delta w^q - (KP_{ij}^q)^2 * \Delta w^{q-1}}{KP_{ij}^{q-1} * \Delta w^q - KP_{ij}^q * \Delta w^{q-1}} \quad (23)$$

Условие окончания итерационного процесса в обоих случаях для каждого столбца ячеек такое: должно быть выполнено  $|\Delta w^{q+1}| < \varepsilon$ .

Данные методы были использованы в алгоритме для настройки трёх различных моделей, результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов с использованием разных методов подбора параметров.

№ эксперимента	Количество итераций		Количество настроенных столбцов в процентах от общего количества столбцов	
	1 метод	2 метод	1 метод	2 метод
1	12	16	87,3	82,2
2	9	10	85,5	86

3	18	20	81,1	78,8
---	----	----	------	------

В процессе анализа отдельных столбцов было выявлено, что в ситуации, когда функция, получившаяся в результате интерполяции полиномом Лагранжа, получается вида (рис.3а),  $|\Delta w^{q+1}|$  не уменьшается, а увеличивается. Поэтому для данной задачи подходит функция прямой (рис.3б).

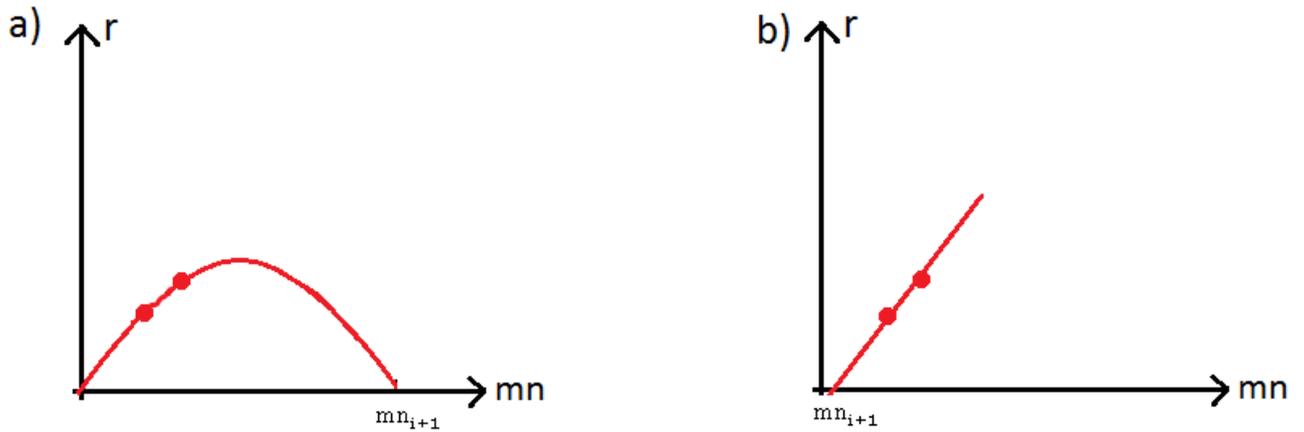


Рисунок 3. Интерполяция полиномом Лагранжа второй степени (а) и линейная интерполяция (б)

Таким образом, использование линейной интерполяции в алгоритме настройки оказалось эффективнее, чем интерполяции полиномом второй степени. Поэтому в приложении используется именно этот метод.

## **Глава 3. Описание программной реализации приложения для настройки газоводяного контакта**

### **3.1. Требования к приложению**

В процессе анализа предметной области и постановки задачи сформировались определенные требования к приложению для настройки газоводяного контакта.

Требования к приложению в целом.

1. Приложение должно содержать следующие функции: настройка ГВК с сохранением исходного давления в скважинах и визуализация результатов каждой итерации.
2. Все исходные файлы должны храниться в одной директории. Выходные файлы должны записываться туда же с именами, которые не могут быть такими же, как другие файлы в этой же директории. Имена файлов, являющихся исходными файлами на разных итерациях, должны содержать номер итерации.
3. Приложение должно поддерживать режимы работы с использованием различного количества ядер процессора. Должна быть возможность во время выполнения алгоритма настройки газоводяного контакта выполнять другие действия, а именно визуализацию результатов какой-либо выполненной итерации и сохранение значений параметров на текущей итерации алгоритма в файл.
4. Приложение предназначено для использования одним специалистом отдела комплексного моделирования разработки газовых месторождений - инженером-проектировщиком любой категории или научным сотрудником любой категории.
5. Для ограничения использования приложения посторонними лицами должен быть разрешен доступ только к определенным рабочим станциям.
6. При сбое в электроснабжении рабочей станции пользователя приложения продолжение работы компьютера в течение некоторого

времени гарантируется источником бесперебойного питания. За это время приложение должно сохранить в файл значения параметров на текущей итерации, чтобы в случае отключения компьютера, после его включения начать выполнение алгоритма не с начала, а с места остановки.

7. Приложение должно быть реализовано в Microsoft Visual Studio на языке C#. Среда программирования – объектно-ориентированная.
8. В приложении должен быть понятный и удобный интерфейс. Все экранные формы должны быть выполнены в едином графическом дизайне.

Должен быть использован шрифт 11 размера Times New Roman.

Иконка приложения – логотип заказчика.

Цветовая палитра пользовательского интерфейса должна состоять из бежевого (Wheat) и светло-бежевого (Cornsilk) цветов. Цвет шрифта – черный.

Язык интерфейса – русский.

Требования к функционалу.

1. При настройке ГВК его координаты в скважинах должны быть наиболее близки к фактическим значениям (задается допустимый предел). Изменение параметров для настройки (множители коэффициента притока) должно происходить с использованием методов вычислительной математики.
2. Значения давления в скважинах после настройки ГВК должны измениться как можно меньше (задается допустимый предел). Изменение параметров для настройки (коэффициент продуктивности, сжимаемость, поровый объем) должно происходить с использованием методов вычислительной математики поочередно.
3. Визуализация должна отображать трехмерную модель, где в каждой ячейке разными цветами показаны вода (синий цвет), газ (желтый цвет)

и их комбинация (зеленый цвет). Данная функция должна быть реализована с помощью OpenGL.

Требования к видам обеспечения.

1. Программное обеспечение.

Для работы приложения должен быть установлен симулятор моделирования Eclipse 2011.2 или другая версия.

Для разработки приложения необходима среда Microsoft Visual Studio.

Базовой программной платформой должна являться операционная система MS Windows 7.

Для визуализации результатов при тестировании приложения может использоваться программа Irap RMS.

2. Информационное обеспечение. Данные, используемые приложением, должны быть в формате, понимаемом Eclipse.

3. Математическое обеспечение. Методы вычислительной математики для изменения параметров, с помощью которых происходит настройка ГВК и давления.

4. Лингвистическое обеспечение.

Язык программирования C#.

Для декодирования данных должна использоваться кодировка Windows-1251. Для организации диалога приложения с пользователем должен применяться графический оконный пользовательский интерфейс.

5. Организационное обеспечение. Пользователям запрещается удалять или перемещать используемые приложением файлы до окончания расчетов. За правильностью входных данных следует следить самому пользователю, проверять их следует перед запуском приложения.

В процессе разработки приложения удалось реализовать все указанные требования.

### 3.2. Реализация распараллеливания

Одним из требований к программе является наличие возможности во время выполнения алгоритма настройки газоводяного контакта выполнять другие действия, а именно визуализацию результатов какой-либо выполненной итерации и сохранение значений параметров на текущей итерации в отдельный файл. Для выполнения этого используется функционал класса `System.Threading.Tasks.Task` следующим образом:

```
Task task=new Task(GWC);  
task.Start();
```

В конструктор задачи `task` здесь передается метод `GWC`, который выполняет алгоритм настройки газоводяного контакта.

Для распараллеливания циклов используется метод `For (Int32, Int32, Action<Int32, ParallelLoopState>)` класса `System.Threading.Tasks.Parallel`.

При изменении в цикле внешних переменных синхронизация обеспечивается с помощью оператора `lock`.

Выполнение расчета в Eclipse также происходит параллельно, для чего используется ключевое слово `PARALLEL`, где указывается число процессов, заданное пользователем.

Были произведены расчеты на 10 моделях, которые показали, что параллельное выполнение циклов позволяет ускорить процесс выполнения одной итерации алгоритма (без учета времени, потраченного на расчет с помощью Eclipse) в  $1,4 \pm 0,1$  раз, а параллельное выполнение расчета с помощью Eclipse позволяет ускорить данный расчет в  $1,5 \pm 0,3$  раз в случае использования 2 процессов, в  $2,3 \pm 0,4$  раз в случае использования 4 процессов. Подробные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты выполнения алгоритма последовательно и параллельно.

№ эксперимента	Выполнение алгоритма без учета расчета в Eclipse		Расчет в Eclipse с различным количеством процессов		
	Последовательно	Параллельно	1	2	4
1	7,912 с.	5,291 с.	1304 с.	767 с.	501 с.
2	7,562 с.	5,101 с.	1115 с.	796 с.	413 с.
3	5,809 с.	4,349 с.	879 с.	732 с.	462 с.
4	8,343 с.	6,339 с.	1505 с.	837 с.	558 с.
5	7,451 с.	5,322 с.	1610 с.	1237 с.	701 с.
6	6,565 с.	4,389 с.	989 с.	658 с.	430 с.
7	6,863 с.	4,702 с.	983 с.	819 с.	492 с.
8	7,264 с.	5,089 с.	1015 с.	563 с.	376 с.
9	7,070 с.	5,35 с.	1002 с.	771 с.	501 с.
10	6,674 с.	5,067 с.	991 с.	762 с.	521 с.

### 3.3 Трехмерная визуализация с помощью OpenGL

Для задания геометрических примитивов необходимо выделить набор вершин, определяющих этот объект. Процедура `glBegin (GLenum mode)` обозначает начало списка вершин, описывающих геометрический примитив. Тип примитива задается параметром `mode`, который при создании квадрата принимает значение `GL_POLYGON` – простой выпуклый многоугольник. Процедура `glEnd()` отмечает конец списка вершин.

Вершины задаются процедурой `glVertex3f(float x, float y, float z)`.

Чтобы куб (рис.7), созданный из прямоугольников, поворачивался при нажатии клавиш со стрелками, задается преобразование поворота процедурой `glRotatef (float angle, float x, float y, float z)`, обеспечивающей

поворот на угол  $\text{angle}$  в направлении против часовой стрелки вокруг прямой с направляющим вектором  $(x, y, z)$ .

### 3.4. Интерфейс приложения

Главное окно приложения выглядит следующим образом (рис.4). Здесь задаются входные параметры для алгоритма настройки газоводяного контакта. В главном меню находятся команды для загрузки файлов, необходимых для расчета (рис.5), а также команда для открытия окна настройки начальных параметров AQUEFETP (рис.6). В поле справа пользователю сообщается о том, какая итерация закончена, сколько стало настроенных ячеек и другая информация о процессе настройки. Есть возможность сохранения значений параметров на текущей итерации в файл, если требуется прервать расчет, чтобы потом можно было продолжить его с той итерации, на которой процесс прервали, а не начинать все сначала. В любой момент времени можно визуализировать результат любой уже завершенной итерации (рис.7).

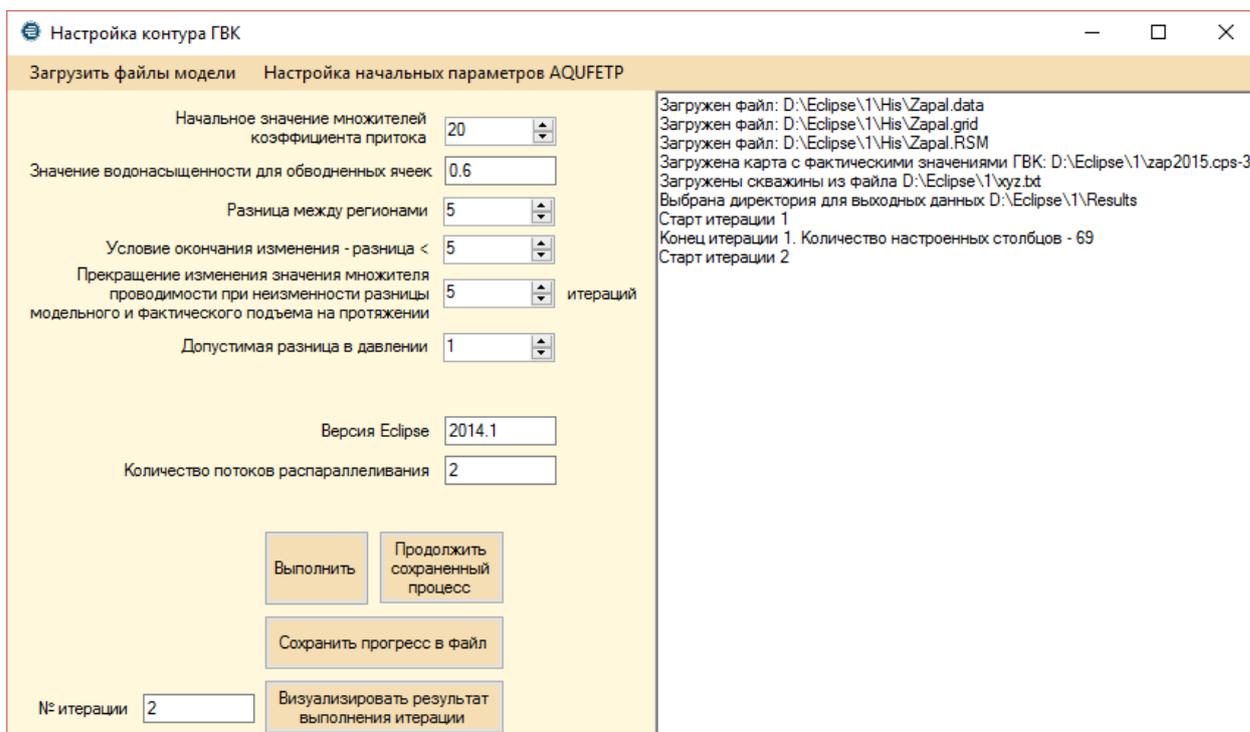


Рисунок 4. Главное окно приложения

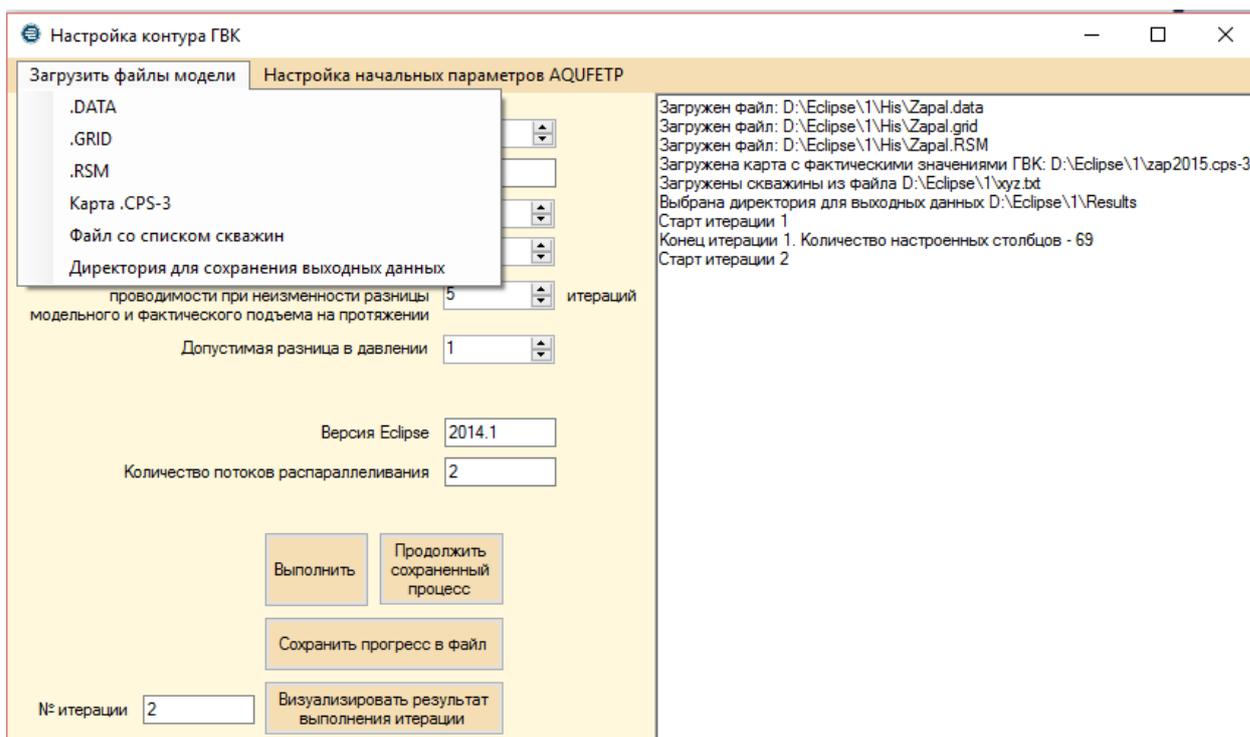


Рисунок 5. Меню для загрузки файлов

Для настройки параметров AQUEFETP используется следующее окно (рис.6). Построение секции AQUANCON происходит с помощью двух опций: можно либо по умолчанию сделать все ячейки последнего слоя модели в одном водоносном пласте, либо, если требуется подключить водоносный пласт не ко всем ячейкам или создать несколько водоносных пластов, можно считать распределение ячеек по пластам из файла. Для каждого водоносного пласта задаются все необходимые параметры, причем начальный объем воды в водоносном пласте можно задать вручную или рассчитать программно. Если рассчитывать его программно, то в открывшемся окне (рис. 8) необходимо выбрать файлы, необходимые для расчета данного параметра.

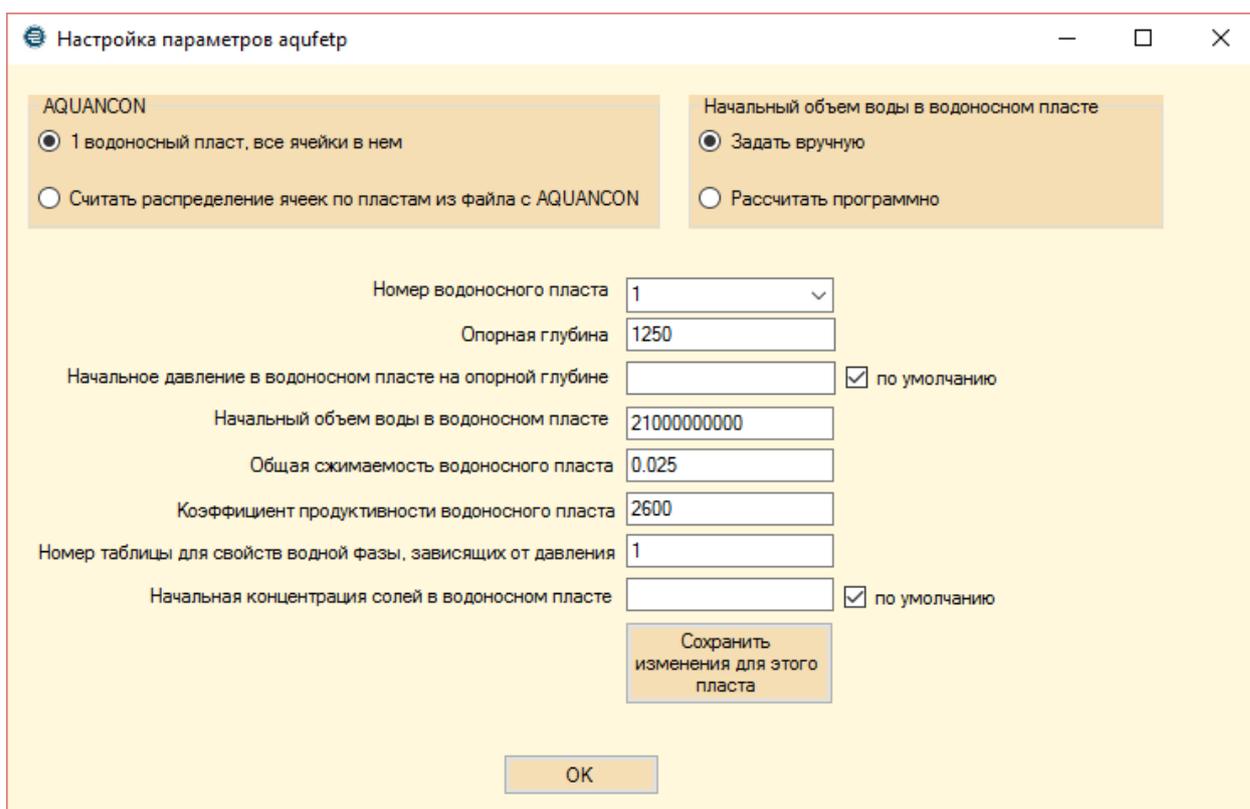


Рисунок 6. Окно настройки параметров AQUEFETP

Для визуализации результатов какой-либо итерации выполняется визуализация куба водонасыщенности на последнюю дату в истории разработки (рис. 7) с использованием технологии OpenGL [8]. Визуализацию можно произвести в любой момент выполнения программы (если данная итерация уже выполнена), так как процесс настройки организован в отдельном потоке или в нескольких отдельных потоках.

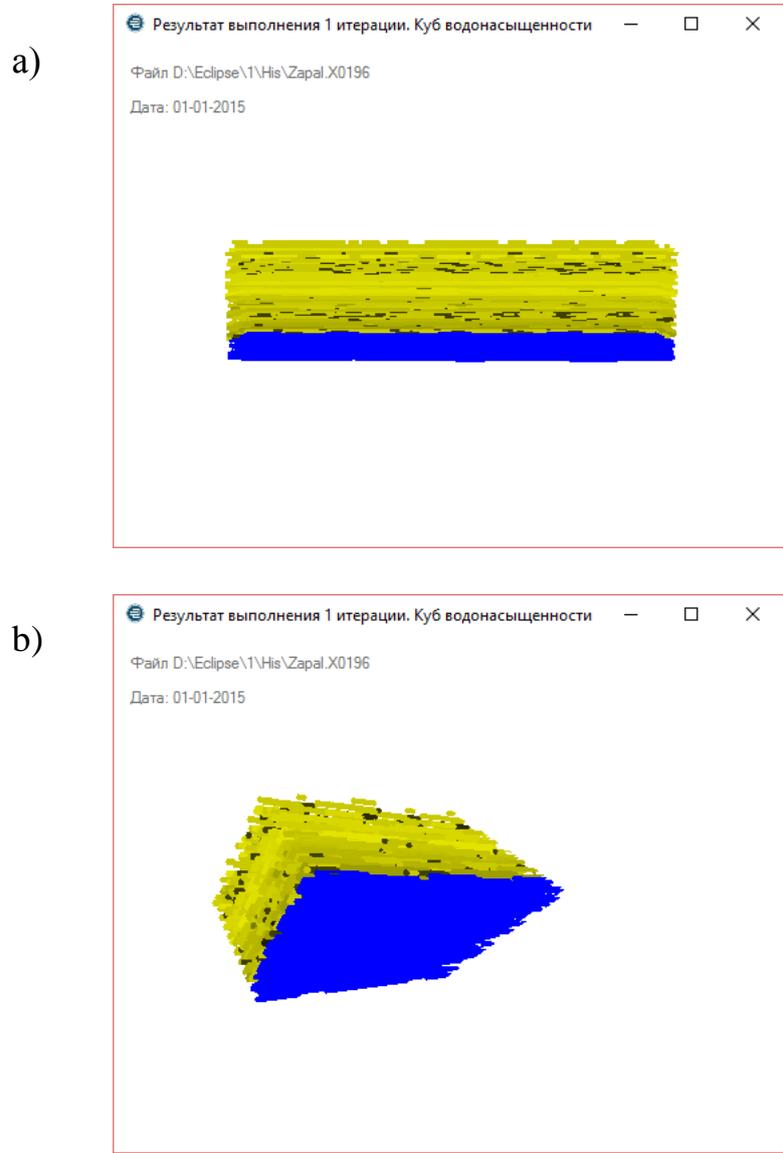


Рисунок 7. Визуализация куба водонасыщенности на последнюю дату в истории разработки (a – вид сбоку, b – вид снизу под углом)

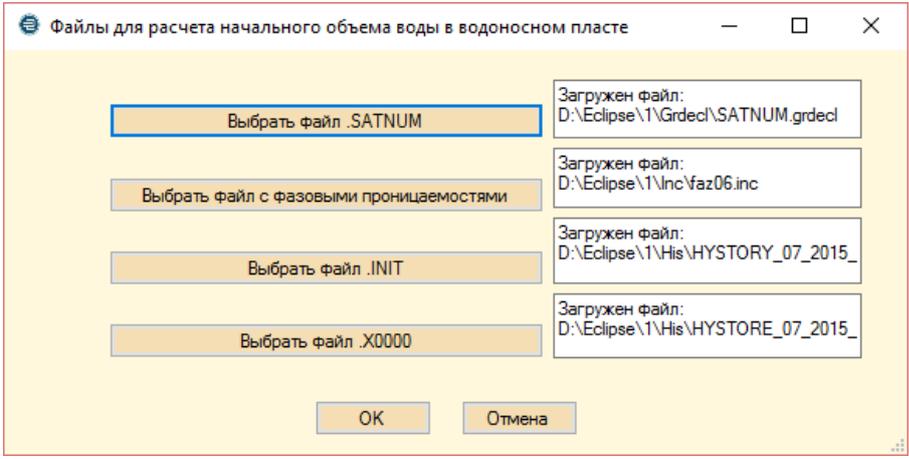


Рисунок 8. Окно выбора файлов для расчета начального объема воды в водоносном пласте

На рисунках 9 и 10 представлена карта разниц между модельным и фактическим подъемом воды до и после настройки. Синим цветом обозначены области, где газовой контакт настроен.

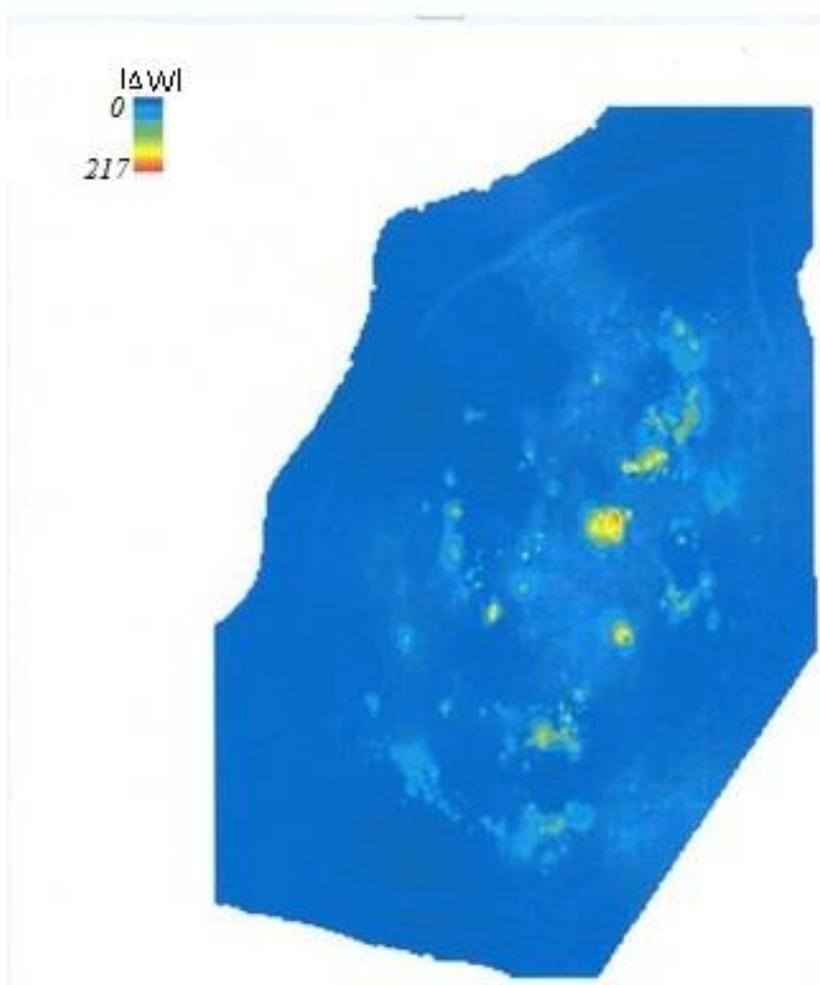


Рисунок 9. Карта разниц между модельным и фактическим подъемом воды до настройки

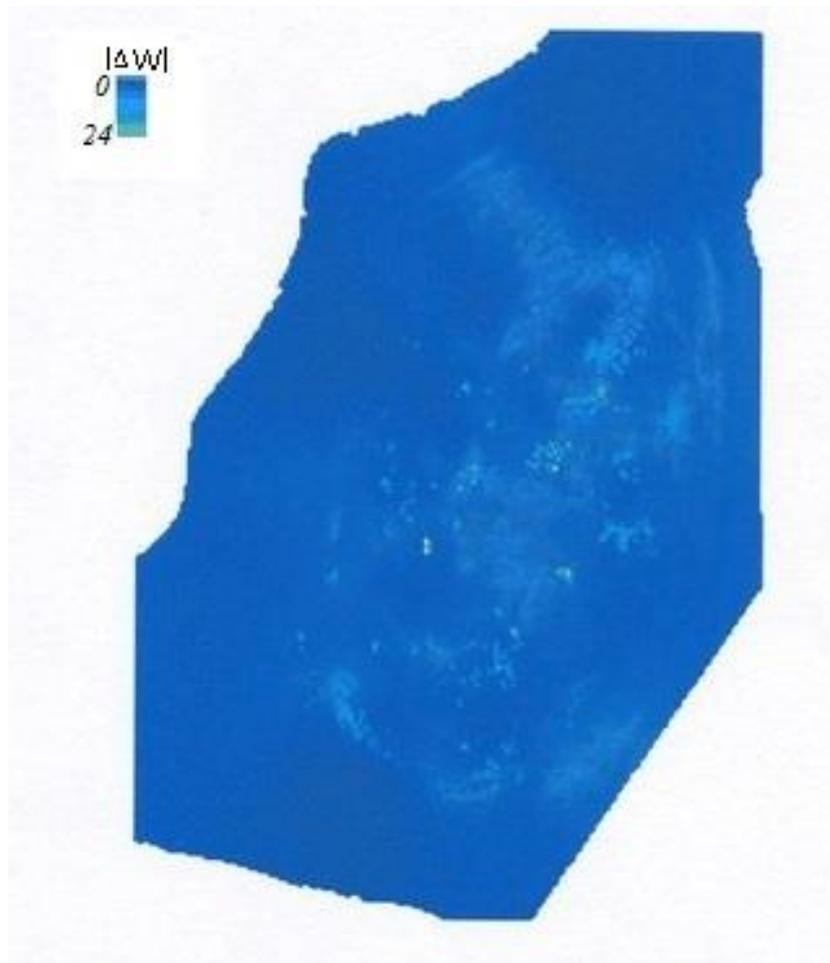


Рисунок 10. Карта разниц между модельным и фактическим подъемом воды после настройки

## Заключение

В процессе выполнения работы все поставленные задачи были выполнены: изучена литература по вопросам гидродинамического моделирования, настройке моделей, алгоритмам вычислительной математики, разработке программных продуктов; разработан алгоритм для решения задачи настройки газовой контактной; разработано приложение для настройки газовой контактной; выбран эффективный метод изменения параметров в разработанном алгоритме.

Организовано построение 3D модели со значениями водонасыщенности с возможностью поворачивать ее вокруг своей оси.

Выполнено распараллеливание циклов программы. Различные задачи (настройка газовой контактной, визуализация результата, сохранение значений параметров на текущей итерации в файл) также выполняются параллельно.

Организован вывод результатов настройки в текстовые файлы: карта регионов в формате .cps-3 text, файл со значениями разниц между модельным и фактическим подъемом воды в каждом столбце. Файл с результатом значений водонасыщенности выводится с помощью Eclipse на каждой итерации.

Программа для настройки газовой контактной позволит освободить инженера-проектировщика от большей части работ при настройке газовой контактной, а также уменьшить число итераций, необходимых для поиска результата, по сравнению с числом итераций, которые бы затратил на выполнение задачи инженер.

### Список используемой литературы

1. Eclipse Schlumberger. 2003. Справочное руководство.
2. Eclipse Schlumberger. 2003. Техническое описание.
3. Вяхирев Р.И., Коротаев Ю.П. Теория и опыт разработки месторождений природных газов. - М.:Недра, 1999. – 416 с.
4. Гладков Е.А. Геологическое и гидродинамическое моделирование месторождений нефти и газа: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 84 с.
5. Курбанова Г.Я. Определение оптимальной продолжительности цикла нестационарного заводнения на синтетической модели// Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть».-2015.-№41.- С.32-35.
6. Леви В.Б. Усовершенствование гидродинамического моделирования на основе автоматизированного моделирования и анализа неопределенностей// Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть».-2011.-№23.- С.42-45.
7. Сыртланов В.Р., Корабельников А.И. Моделирование закачки полимеров для повышения нефтеотдачи пласта: проблемы и особенности//Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 6. – С. 41-44.
8. Хилл Ф. OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов. – СПб.: Питер, 2002. – 1088 с.

## Приложения

### Приложение 1. Основные структуры

```
public struct Column //столбец ячеек
{
    public double r_prev; //Γi-1
    public double r; //Γi
    public int act; //флаг действия (настраивать, уже настроено или не
                    //настраивать)
    public double z_top; //координата z вершины столбца
    public int aq; //водоносный пласт, в котором находится столбец
    public int it_count; //количество итераций, при которых разница не
                        //менялась
    public double mnoz; //множитель коэффициента притока
    public double mnoz_prev; //множитель коэффициента притока на предыдущей
                            //итерации
}
public struct Cell //ячейки
{
    public double swat0; //водонасыщенность на первую дату
    public double swat; //водонасыщенность на последнюю дату
    public double xmin; //координата x ячейки слева
    public double xmax; //координата x ячейки справа
    public double ymin; //координата y ячейки сзади
    public double ymax; //координата y ячейки спереди
    public double z; //координата z середины ячейки
}
public struct Aquefetz //водоносные пласты
{
    public double sum; //на сколько изменились множители коэффициента притока
    public double otr; //на сколько нужно изменить оставшиеся множители
}
public Column[,] col=new Column[n2,n3]; //n2 - размерность по j, n1 - по i
public Cell[,,,] cell=new Cell[n1,n2,n3]; //n3 - размерность по k
public Aquefetz[] aquefetz = new Aquefetz[count]; //count-количество водоносных пластов
```

### Приложение 2. Определение разниц между модельным и фактическим значениями подъема воды в столбцах модели.

```
bool doing = false;
Parallel.For(0, col.GetLength(0), (j) =>
{
    for (int i = 0; i < col.GetLength(1); i++)
    {
        col[j, i].act = 0;
        col[j, i].r_prev = col[j, i].r;
        for (int k = 0; k < cell.GetLength(0)-1; k++)
            if (cell[k, j, i].swat < swat_border & cell[k+1, j, i].swat >= swat_border)
            {
                double sum = 0;
                int number = 0;
                double xmin = cell[k, j, i].xmin + hx - (cell[k, j, i].xmin - minx) % hx;
                double xmax = cell[k, j, i].xmax - (cell[k, j, i].xmax - minx) % hx;
                double ymin = cell[k, j, i].ymin + hy - (cell[k, j, i].ymin - miny) % hy;
                double ymax = cell[k, j, i].ymax - (cell[k, j, i].ymax - miny) % hy;
                for (double y0 = ymin; y0 <= ymax; y0 = y0 + hy)
                    for (double x0 = xmin; x0 <= xmax; x0 = x0 + hx)
                    {
                        string s;
```

```

        lock (thisLock)
        {
            f.Position = p + (int)(((maxy - y0) / hy + (x0 - minx) * rowy / hx) / cols) *
shag_str;
            s = sr.ReadLine();
        }
        while (s.IndexOf(" ") != -1) s = s.Replace(" ", " ");
        if (s[0] == ' ') s = s.Remove(0, 1);
        s = s.Split(' ')[(int)(((maxy - y0) / hy + (x0 - minx) * rowy / hx) % cols)];
        s = s.Replace('.', ',');
        sum = sum + Convert.ToDouble(s);
        number++;
    }
    double r = cell[k, j, i].z - sum / number;
    if (Math.Abs(r) < (double)numericUpDown6.Value) col[j, i].act = 1;
    else
        lock (thisLock)
        doing = true;
    if (sum / number < col[j, i].z_top) col[j, i].act = 2;
    break;
}
}
});

```

### Приложение 3. Расчет множителей коэффициента притока.

```

Parallel.For(0, col.GetLength(0), (j) =>
{
    for (int i = 0; i < col.GetLength(1); i++)
        if (col[j, i].aq != -1)
            {
                if (col[j, i].r_prev == col[j, i].r) col[j, i].it_count++; else col[j, i].it_count =
0;
                if (col[j, i].it_count > (int)numericUpDown2.Value)
                    col[j, i].act = 1;
                if (col[j, i].act == 0 & col[j, i].r < 0)
                    {
                        if (col[j, i].r != col[j, i].r_prev)
                            lock (thisLock)
                                aquefetsp[col[j, i].aq].otr -= (col[j, i].mnoz_prev - col[j, i].mnoz) * col[j, i].r
/ (col[j, i].r_prev - col[j, i].r);
                        else
                            lock (thisLock)
                                aquefetsp[col[j, i].aq].otr += col[j, i].mnoz / 2;
                    }
                if (col[j, i].act == 0 & col[j, i].r > 0)
                    {
                        double mnoz_new;
                        if (col[j, i].r != col[j, i].r_prev)
                            mnoz_new = col[j, i].mnoz - (col[j, i].mnoz_prev - col[j, i].mnoz) * col[j, i].r /
(col[j, i].r_prev - col[j, i].r);
                        else mnoz_new = col[j, i].mnoz / 2;
                        lock (thisLock)
                            aquefetsp[col[j, i].aq].sum += mnoz_new - col[j, i].mnoz;
                            col[j, i].mnoz_prev = col[j, i].mnoz;
                            col[j, i].mnoz = mnoz_new;
                    }
                if (col[j, i].act == 2)
                    {
                        lock (thisLock)
                            aquefetsp[col[j, i].aq].sum += 0.00001 - col[j, i].mnoz;
                            col[j, i].mnoz = 0.00001;
                    }
            }
}

```

```

    }
  });
  Parallel.For(0, aquefetp.Length, (aq) =>
  {
    double sum = (double)aquefetp[aq].sum / aquefetp[aq].otr;
    for (int j = 0; j < col.GetLength(0); j++)
    for (int i = 0; i < col.GetLength(1); i++)
    if (col[j, i].aq == aq)
    if (col[j, i].act == 0 & col[j, i].r < 0)
    {
      double a = 0;
      if (col[j, i].r != col[j, i].r_prev)
        a = -(col[j, i].mnoz_prev - col[j, i].mnoz) * col[j, i].r / (col[j, i].r_prev -
col[j, i].r);
      else a = col[j, i].mnoz / 2;
      col[j, i].mnoz_prev = col[j, i].mnoz;
      col[j, i].mnoz = col[j, i].mnoz - sum * a;
    }
    aquefetp[aq].sum = 0;
    aquefetp[aq].otr = 0;
  });

```