

Минкин Александр Сергеевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ NURBS К СОЗДАНИЮ
ТРЕХМЕРНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ
ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА НАЧАЛЬНО-КРАЕВЫХ ЗАДАЧ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Институте Математического Моделирования Российской Академии Наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Гасилов В.А.,
зав. отделом ИММ РАН

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Повещенко Ю. А.,
ведущий научный сотрудник ИПМ РАН

кандидат физико-математических наук
Александров А. В.,
научный сотрудник ИММ РАН

Ведущая организация: Институт автоматизации проектирования
РАН

Защита состоится “ 08 ” ноября 2007 в ____ ч. ____ мин. на заседании
Диссертационного совета К 002.058.01 при Институте Математического
Моделирования Российской Академии Наук по адресу:
125047, Москва, Миусская пл., 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, просьба
направлять по указанному адресу в двух экземплярах не позднее, чем за две
недели до защиты.

Автореферат разослан “ ____ ” октября 2007.

Учёный секретарь Диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Прончева Н.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования и актуальность темы

Методы и программы для численного решения начально-краевых задач математической физики развиваются на протяжении многих десятилетий. Развитие компьютерных технологий сделало вычислительный эксперимент мощным и эффективным способом решения проблем прикладной математики. Появление новых математических моделей и численных методик, рост объема и сложности современных вычислений делают необходимым создание новых средств автоматизации построения компьютерных моделей и подготовки исходных расчётных данных.

Использование современной вычислительной техники для решения задач математического моделирования делает необходимым разработку и внедрение комплексного подхода к их решению. Программные средства, разрабатываемые для этой цели, должны обеспечивать поддержку различных видов вычислительной работы таких, как построение геометрической модели области решения задачи, генерацию расчетной сетки, составление системы сеточных уравнений соответственно принятой математической модели, выполнение расчёта и обработку полученных данных. К программным средствам автоматизации научных исследований предъявляются требования робастности и устойчивости при изменении входных параметров математических моделей в широком диапазоне значений, а также при переходе от геометрически простых расчетных областей к сложным, многосвязным, разномасштабным областям.

Математические модели физических процессов обычно описываются дифференциальными уравнениями в частных производных, а также интегральными и интегро-дифференциальными уравнениями. Для решения прикладных задач в соответствующих постановках используются, в основном, численные методы, из которых наибольшее распространение получили метод конечных элементов, конечных разностей и граничных элементов. В решении общей вычислительной задачи с использованием вышеуказанных численных методов можно выделить три этапа: предобработку, расчёт и постобработку. Первый этап состоит в задании геометрии расчётной области и определении начальных и граничных условий. Далее производится построение

расчётной сетки для заданной геометрии. Выбор типа сетки определяется характером решаемой задачи, геометрией области и требуемым объемом вычислений. Следующий этап – собственно расчёт, результатом которого являются некоторые распределения физических величин по элементам сетки. Заключительный этап предполагает постобработку результатов расчёта, нахождение физических и вспомогательных геометрических характеристик, а также их визуализацию на сетке. Сетка, используемая для визуализации, довольно часто не совпадает с той, что используется для расчёта.

Первый и третий этапы являются вспомогательными по отношению к основной задаче решения уравнений математической физики. Однако, в задачах, определенных в пространственных областях сложной формы, вопросы подготовки и анализа геометрических данных настолько усложняются, что превращаются в самостоятельные проблемы, для эффективного решения которых требуются специальные средства автоматизации. Разработка таких средств является одной из проблем, исследуемых в данной работе.

Возможность задания реальной геометрии изучаемых объектов – важнейшее требование к прикладному программному обеспечению. Данную задачу удобно решать с помощью специализированных CAD систем. Одним из распространенных методов описания пространственных тел, задаваемых с помощью параметрических кривых и поверхностей, является метод, основанный на граничном представлении. Граничное представление удобно применять для подготовки данных при решении начально-краевых задач математической физики, т.к. сами границы в этом случае определяются функционально. Выбор вида параметрического представления производится из соображений универсальности. В качестве такого рода геометрических примитивов удобно использовать NURBS кривые и поверхности, позволяющие описывать объекты как с криволинейными, так и с прямолинейными границами. NURBS широко применяются для задания кривых и поверхностей во многих современных CAD системах. Примерами таких CAD систем являются Rhinoceros, T-Flex, Unigraphics. Данные модели используются также в универсальных форматах обмена геометрическими данными, например, они реализованы в известном формате STEP. Разработка средств импорта

топологической и геометрической информации из STEP является одной из проблем, решаемых в данной диссертационной работе. При задании геометрии также определяются граничные условия, каждое из которых сопоставляется определенной геометрической сущности. В частности, в двумерном случае условия ставятся в соответствие контурным кривым, а в трехмерном – граничным поверхностям. Сами граничные условия имеют произвольную структуру, что весьма удобно при решении различного рода задач.

Следующий этап подготовки данных для численного моделирования – это генерация сетки, которая производится с использованием информации о геометрии модели, заданной NURBS. В зависимости от характера решаемой задачи с использованием NURBS параметризации можно строить как структурированные, так и гибридные сетки. В рамках граничного представления дискретизация осуществляется иерархически в порядке возрастания топологической размерности элементов модели. Для двумерной расчётной области сначала производится разбиение кривых, дающих систему контуров. Соответственно, один из этапов построения 3D сетки состоит в генерации поверхностной сетки. Существенную сложность представляет дискретизация составной поверхности, состоящей из NURBS сегментов, содержащих дыры и сложные границы. Эта задача решается построением триангуляции. Особенность 3D моделей, представляемых CAD системами, состоит в том, что параметризация поверхностей не совпадает с параметризацией лежащих на них кривых, что приводит к необходимости построения алгоритмов поиска прообразов точек моделируемой NURBS поверхности. Данные алгоритмы реализованы в рамках общего алгоритма дискретизации составной поверхности. Для построения триангуляции используется фронтальный алгоритм в сочетании с параметрическим отображением. Построение объемной сетки осуществляется методом Делоне с ограничениями.

Основным этапом решения начально-краевой задачи является расчёт, осуществляемый после задания геометрии, построения сетки, определения начальных и граничных условий. Алгоритм расчёта основан на методе конечных элементов. Для представления криволинейной геометрии и повышения точности вычислений в условиях неоднородности

среды применяются элементы высокого порядка. В рамках общего КЭ подхода возможно также использование NURBS элементов. NURBS технология позволяет использовать элементы высокого порядка с высокой гладкостью сопряжений в сочетании с удобством геометрического описания. Длительность вычислений зависит от объема сетки, типа элементов и постановки задачи.

В связи с вышесказанным, разработка интегрированной программной системы для численного решения трехмерных начально-краевых задач является особенно актуальной проблемой. Программный комплекс должен включать универсальные средства описания и дискретизации пространственных расчетных областей сложной формы, задания граничных условий различных типов, предоставлять возможность использования конечно-элементных аппроксимаций различных типов, гарантировать точность и надежность получаемых численных решений. При создании современных программных продуктов таких, как GIMM[1-6] и MARPLE[8], используется современный объектно-ориентированный подход, позволяющий снизить затраты на поддержку и модификацию программных модулей.

Тестирование и апробация – важные этапы разработки интегрированных программных комплексов. Программные средства, созданные в результате выполнения данной работы, были использованы для исследования продуктивности нефтяных скважин. При разработке нефтяных месторождений затраты, связанные с бурением и дальнейшим обслуживанием скважин с каждым годом растут, в связи с резким увеличением потребления нефтепродуктов и постепенным истощением запасов нефтяных месторождений, а также ростом популярности товарно-денежных отношений в нашей стране. В связи с этим, постоянно возрастает актуальность вопросов, связанных с компьютерным моделированием процессов нефтеразработки, в частности, с созданием математических моделей притока флюида к скважине, которые позволяют оценить её дебит в зависимости от физических характеристик нефтегазового пласта и его геометрии. Сложность скважин как инженерных сооружений и необходимость учета геометрии пластовых структур определяет важность геометрического моделирования.

Известно, что характерные размеры пласта на несколько порядков

больше размеров скважин. Разномасштабность является важной проблемой, возникающей при моделировании притока флюида к скважине на основе численного решения уравнений фильтрации. Для решения данной проблемы в диссертации предложено специальное граничное условие, соответствующее скважине. Контур постановки данного условия при решении уравнений фильтрации отодвигается от границ скважины, благодаря чему снижается нагрузка на препроцессор и расчётный модуль. Пространство между скважиной и контуром постановки граничного условия называется макроблоком. В области макроблока делаются предположения о характере течения флюида, позволяющие заменить численный расчёт в его пределах аналитическим решением. Тем самым, область решения делится на две части: макроблок и внешнюю часть. Численный расчёт производится только во внешней части, что позволяет существенно снизить количество сеточных узлов по сравнению с методикой расчёта фильтрации в полной области.

Цели работы

- Создание интегрированного программного комплекса для прикладных исследований процессов, описываемых в рамках двумерной или трехмерной начально-краевой задачи. Программная система должна обеспечивать полный цикл численного решения нестационарной нелинейной задачи, т.е. выполнять следующие функции: импорт геометрической модели расчетной области в виде совокупности NURBS примитивов из файла формата STEP AP 214 в локальные структуры данных MARPLE, задание начальных, граничных условий, а также набора выходных параметров, генерацию гибридной сетки конечных элементов, формирование системы сеточных уравнений и её решение, обработку результатов расчетов.
- Разработка и реализация математической модели, решающей проблему разномасштабности размеров скважины и пласта, для расчёта продуктивности нефтяных скважин при нелинейном законе фильтрации Форхгеймера. Модель должна учитывать реальную геометрию нефтяного коллектора и скважины.

Научная новизна

1. Разработаны новые алгоритмы и программные средства импорта геометрической и топологической информации в структуры данных MARPLE[9], используемые для численного моделирования.
2. Реализована новая технология подготовки данных и расчёта задач с криволинейными границами на основе использования NURBS элементов, позволяющих повысить точность геометрического описания и управлять порядком аппроксимации. NURBS технология является дальнейшим развитием суперэлементного подхода. Импорт NURBS элементов производится непосредственно из файлов формата STEP.
3. Разработаны следующие алгоритмы генерации сеток: алгоритм триангуляции поверхностей, состоящих из совокупности NURBS сегментов сложной формы[7]; алгоритм генерации гибридных сеток, объединяющий методы параметрических отображений и построения триангуляций; алгоритмы и программные средства генерации трехмерных сеток, объединяющие кинематические методы, методы параметрических отображений и построение тетраэдризаций.
4. Реализована математическая модель притока флюида к нефтяной скважине в трехмерной постановке, решающая проблему разномасштабности характерных размеров скважины и нефтяного пласта. На основе построенной модели проведены численные исследования дебита скважины и характера течения в зависимости от физических и геометрических характеристик пласта. В численном эксперименте показана эффективность данной модели.

Достоверность полученных результатов обеспечена обоснованностью применяемых математических моделей, использованием современных методов решения начально-краевых задач, а также верификацией полученных моделей путем сравнения с аналитическими оценками и результатами других авторов.

Практическая значимость

В разработанном программном комплексе реализована современная технология подготовки данных и новый метод расчёта с использованием NURBS, что позволяет облегчить процесс численного анализа начально-краевых задач. Данный программный комплекс может быть применен для исследования широкого класса проблем естествознания и техники, формулировки которых приводят к смешанным начально-краевым задачам. Модульная структура программной системы позволяет использовать отдельные её блоки в составе других интегрированных систем САПР и АСНИ, а также программных комплексов GIMM и MARPLE. Созданный программный комплекс использовался для исследования трехмерных нестационарных тепловых процессов в нелинейных средах, а также для анализа продуктивности нефтяных скважин. Разработанные программные средства позволяют учитывать реальную геометрию нефтяных скважин и пластов, а также, в случае нелинейного закона фильтрации, выделять области наиболее существенного его влияния в практически важных случаях.

Апробация работы

- Международная конференция "Parallel CFD 2004", Las Palmas de Gran Canaria, Испания, 24-27 мая, 2004 г.
- Всероссийская Научно-Техническая Конференция "Параллельные вычисления в задачах математической физики", 21-25 июня, 2004 г., г. Ростов-на-Дону.
- Международная конференция "Parallel CFD 2005". University of Maryland, College Park, Maryland, США, 24 - 27 мая, 2005 г.
- International Conference on matrix methods and operator equations, Москва, ИВМ РАН, 20-25 июня, 2005 г.
- Всероссийская научная конференция "Научный сервис в сети Интернет: многоядерный компьютерный мир", 24-29 сентября 2007 г., г. Новороссийск.

- Совместный семинар ИММ РАН и кафедры математического моделирования МФТИ под руководством проф. д.ф.-м.н. Е.И. Леванова, 18 октября 2007г.
- VI-й научно-технической конференции "Молодежь в науке", г. Саров, Нижегородская обл., РФ, 30 октября - 1 ноября 2007 г.

Объем и структура диссертации. Публикации

Диссертация изложена на 114 страницах машинописного текста, состоит из введения, трех глав и выводов. Работа содержит 2 таблицы, 24 рисунка. Список использованной литературы содержит 93 наименования. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, список которых содержится в конце автореферата.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность разработки современного базового программного комплекса для прикладных исследований физических процессов. Обоснована необходимость создания универсальной технологии, облегчающей импорт геометрических данных, генерацию сетки и расчёт. Приведено краткое описание по главам. Определена цель исследований и научная новизна работы.

Первая глава посвящена проблеме подготовки данных для начально-краевых задач с использованием CAD систем, стандартам обмена геометрическими данными, заданию и импорту NURBS геометрии, а также построению сеток в заданных таким образом расчётных областях.

В разделе 1.1 рассматриваются способы представления форм в системах геометрического моделирования и вопросы импорта геометрии и топологии расчётной области. Приведено краткое описание стандартов обмена данными между системами геометрического моделирования. Подробно рассмотрен формат STEP, использованный автором для подготовки данных прикладных расчётов.

В разделе 1.2 рассматриваются вопросы представления геометрии с помощью NURBS в рамках граничного представления. Описана модель NURBS кривых, поверхностей и объемов. Рассмотрены основные алгоритмы работы с NURBS объектами. Представлены алгоритмы поиска прообраза

точек NURBS кривых и поверхностей, необходимые для дальнейшей дискретизации заданной геометрии.

В разделе 1.3 описываются геометрические модели, используемые для представления расчетных областей и сеток в системе MARPLE. Рассмотрены модели, основанные на топологических комплексах с вложениями, в сочетании с геометрическим описанием на основе NURBS параметризации. Описаны алгоритмы импорта данных из STEP в MARPLE.

В разделе 1.4 рассматриваются вопросы генерации расчётных сеток в рамках разрабатываемого программного комплекса. Излагается общая методика генерации поверхностных сеток для сложных NURBS сегментов на основе совместного использования методов параметрического отображения и триангуляций (рис.1). Предложен алгоритм генерации блочных двумерных сеток, которые в дальнейшем используются для построения сечений трехмерных расчетных областей. Специальные методики объединения гранично-согласованных сеток позволяют комбинировать сетки, построенные разными способами, тем самым получая гибридные сетки (рис.2). Далее рассматривается алгоритм построения треугольных сеток для геометрий, заданных составными NURBS поверхностями, сочетающий фронтальный алгоритм триангуляции с параметрическим отображением.

Изложена методика построения трехмерных сеток методом объединения сечений и кинематическими методами. Предполагается, что расчетная область представляет собой множество точек, определяемых движением плоского тела или сечения. Для дискретизации тела необходимо построить набор последовательных сечений и разбить сечения на изоморфные сетки, а затем построить на соответствующих друг другу элементах соседних сечений призматические элементы трехмерной сетки. Тип элементов объемной сетки зависит от типа элементов сеток в сечениях. В том случае, когда сечения разбиты на треугольники, объемная сетка состоит из треугольных призм, а если сечения разбиты на четырехугольные элементы, то объемная сетка будет состоять из призм с четырехугольным основанием. Сечения, по которым строится сетка, представляются различными способами. Они могут задаваться в качестве исходных данных об объекте, а могут получаться на основе информации о кинематическом методе построения расчетной

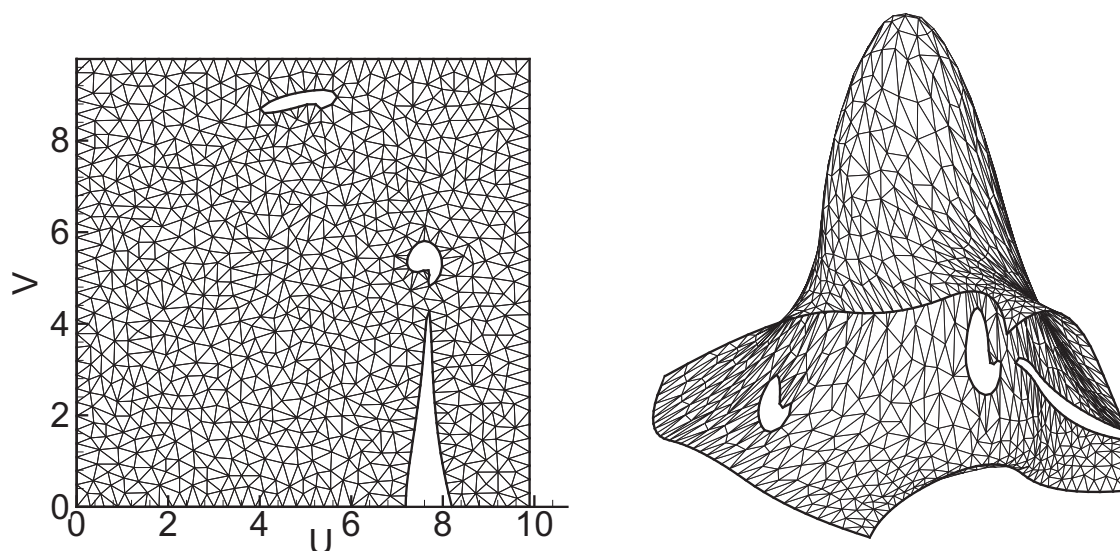


Рис. 1. Параметрическая область сложного NURBS сегмента (слева) и соответствующая поверхностная сетка (справа)

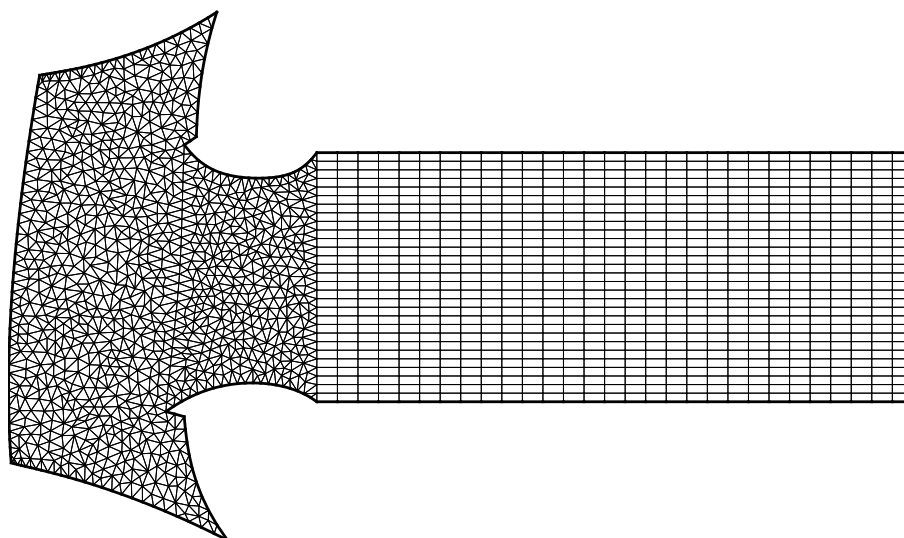


Рис. 2. Гибридная сетка

области. Разработанные программные средства генерации объемных сеток позволяют разбивать объекты, полученные в результате поступательного, вращательного движения сечений, а также в результате произвольных

сложных движений, описываемых аффинными преобразованиями, которые допускают деформацию сечений в процессе движений.

Во второй главе описывается конечно-элементная численная методика решения трехмерных начально-краевых задач. Рассмотрена проблематика расчёта продуктивности нефтяных скважин, связанная с проблемой разномасштабности скважины и пласта.

В разделе 2.1 изложены основы технологии метода конечных элементов: преобразование координат, численное интегрирование, сборка разреженной матрицы. Рассмотрен вопрос постановки граничных условий. Приведено описание методики расчёта на NURBS элементах.

В разделе 2.2 изложены вопросы, связанные с моделированием пластовых систем и скважин. Приведена постановка задачи оценки продуктивности скважин, связанная с решением системы уравнений, имеющей вид:

$$\text{grad } p = -\frac{\mu}{k}\mathbf{u} - \beta\rho\mathbf{u} + F, \quad (1)$$

$$\text{div}(\rho\mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\rho = f(p). \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость $[ML^{-1}T^{-1}]$,

k – коэффициент проницаемости $[L^2]$,

β – коэффициент Форхгеймера $[L^{-1}]$,

F – объемные силы $[ML^{-2}T^{-2}]$.

Уравнение состояния (3) будем рассматривать в следующем виде:

$$\rho = \varphi_T p, \quad (4)$$

где $\varphi_T = (\frac{\partial \rho}{\partial p})_T$, $[\varphi_T] = T^2 L^{-2}$.

Далее представлен один из способов решения проблемы разномасштабности с помощью введения специальной поправки к давлению в скважине. Данный метод основан на оценке эффективного радиуса скважины. Контуры самих скважин не аппроксимируются разностной сеткой, а размер сеточной ячейки на несколько порядков больше характерного размера скважины. Истинное давление в скважине предполагается рассчитывать по уравнению

$$P_0 = P_p - \frac{Q}{C}, \quad (5)$$

$$C = \frac{2\pi kh}{\mu \ln(r_e/R_0)} \quad (6)$$

где P_0 – давление на забое скважины [$ML^{-1}T^{-2}$],

P_p – расчетное давление в ячейке,

r_e – эффективный радиус скважины,

Q – объемный дебит скважины,

R_0 – радиус скважины,

h – размер ячейки.

Таким образом, эффективный радиус скважины зависит от закона фильтрации, используемого метода аппроксимации системы уравнений фильтрации и типа сетки.

Далее приведено теоретическое описание модели макроблока для расчёта продуктивности наклонно-горизонтальных скважин при нелинейном законе фильтрации Форхгеймера. Макроблоком называется область вблизи скважины, в которой течение флюида предполагается плоскорадиальным. Модель макроблока реализована программно в виде специального граничного условия. В рамках данного алгоритма производится коррекция давлений на границе макроблока с помощью введения поправок. Вычисление поправок производится по аналитической формуле в рамках предположения о плоскорадиальности притока флюида к стволу скважины. Тем самым, формулы для давления на границе макроблока и для поправок к давлению можно записать так:

$$P = \sqrt{P_0^2 + 2\frac{\mu A}{k\varphi_T} \ln \frac{R}{R_0} + 2\frac{R-R_0}{R_0R\varphi_T} \left(\beta - \frac{R+R_0}{2R_0R}\right) A^2}, \quad (7)$$

$$\Delta P = \frac{\Delta A}{P} \left(\frac{\mu A}{k\varphi_T} \ln \frac{R}{R_0} + 2\frac{R-R_0}{R_0R\varphi_T} \left(\beta - \frac{R+R_0}{2R_0R}\right) A\right), \quad (8)$$

где P – давление на расстоянии R от центра макроблока,

$A = \rho u R$ – расход в точке E на границе макроблока,

ΔA – разница между численным и аналитическим значениями расхода на границе.

В главе 3 приведены примеры двумерных и трехмерных расчётных областей, их дискретизаций различными типами элементов, а также результаты расчётов задачи фильтрации с использованием модели макроблока.

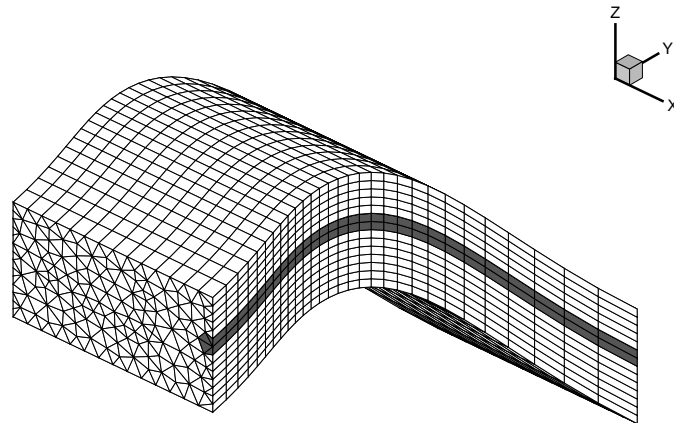


Рис. 3. Призматическая сетка для решения задачи фильтрации. Выделенные ячейки соответствуют макроблоку

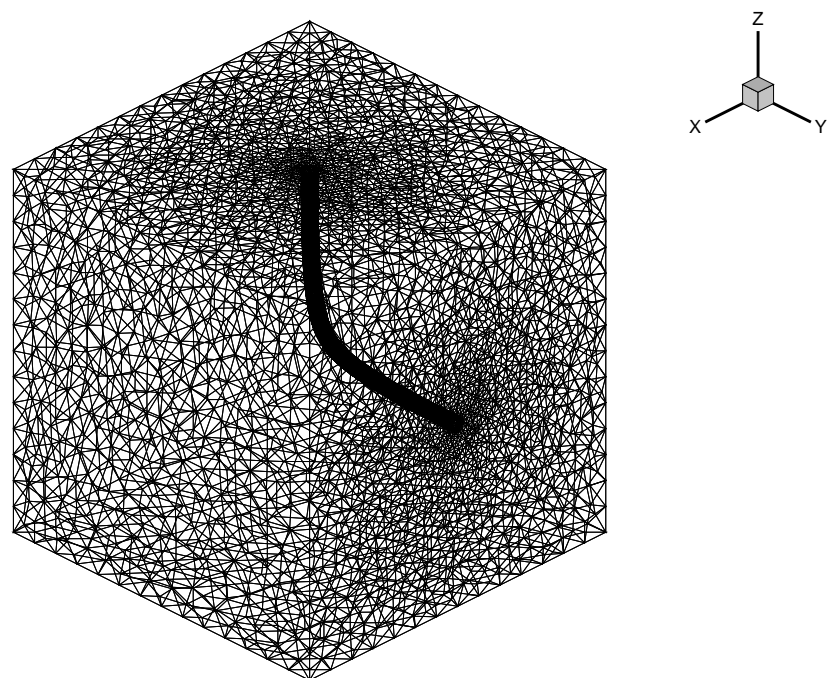


Рис. 4. Фрагмент макроблока внутри тетраэдральной сетки для решения задачи фильтрации

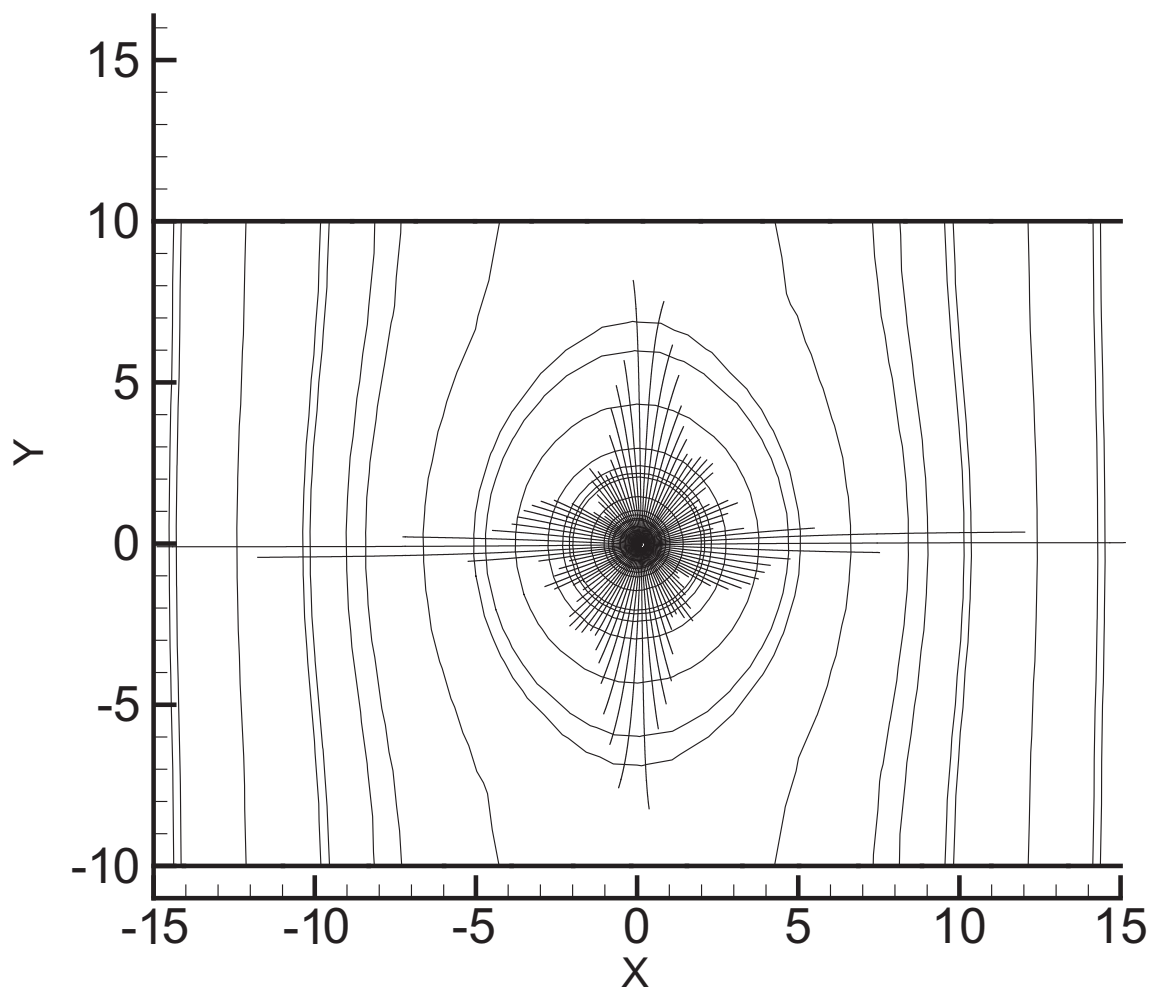


Рис. 5. Изолинии давления жидкости вблизи скважины, а также расчётные линии тока, отвечающие максимальному отклонению 3% от плоскорадиального течения

В разделе 3.1 изложены постановки задач, а также примеры расчётных областей и сеток. Приведены результаты модельных тестовых задач для уравнения Пуассона и нестационарного уравнения теплопроводности при дискретизации расчётных областей различными типами конечных элементов. Представлены расчёты уравнения теплопроводности с использованием NURBS элементов. Фрагменты расчётных сеток для решения задачи фильтрации с использованием макроблока приведены на рис.3 и 4. Соответствующие расчётные области определяют различные варианты модели макроблока. На рис.3 макроблок определен выделенной группой ячеек, удаляемых из сетки. На рис.4 макроблок определен NURBS поверхностями, параметризация которых используется при задании граничного условия.

В разделе 3.2 приведены результаты модельных расчётов оценки продуктивности наклонно-горизонтальных скважин с использованием макроблока и с полной дискретизацией области. На основе результата полного двумерного расчёта фильтрации сделана оценка размера макроблока с помощью вычисления отклонений течения вблизи скважины от плоскорадиального (рис.5). Расчёт линий тока для прямоугольного нефтяного пласта 200×20 м. со скважиной диаметром 0.2 м. в центре показал, что максимально допустимый размер макроблока при отклонении 3% от плоскорадиального течения составляет $0.1H$, где H - высота пласта, что на порядок больше диаметра скважины. Для надёжности размер макроблока в расчётах выбирался $0.05H$. Произведена оценка области влияния нелинейности Форхгеймера для различных расчётных областей показывающая, что наибольшим образом она проявляется внутри макроблока. Вне макроблока характер течения с высокой точностью можно считать линейным, что позволяет использовать закон фильтрации Дарси при численном решении внешней задачи. Результаты сравнения расчёта с использованием макроблока с аналитическими оценками подтверждают, что предложенный метод позволяет вычислить дебит скважины с точностью до 5%. Сравнение расчётов с применением макроблока и численных расчётов с полной дискретизацией области показало совпадение до 8%, в зависимости от размера макроблока.

В заключении приведены краткие выводы по теме диссертации, представлены основные направления перспективных исследований по предложенной методике.

Основные результаты и выводы

- Разработан современный комплекс программ для решения трехмерных задач математической физики, который включает программные средства анализа геометрической и топологической информации при импорте из файлов формата STEP AP 214. В программной системе реализованы алгоритмы импорта NURBS сеток из STEP в локальные структуры данных, а также алгоритмы генерации КЭ сеток, созданные на основе следующих методов: параметрического отображения, объединения гранично-согласованных сеток, объединения сечений

(кинематический), а также средства получения неструктурированных треугольных и тетраэдральных сеток с возможностью локального измельчения.

- Создан интегрированный программный комплекс для решения трехмерных нестационарных и нелинейных задач в геометрически сложных областях. Программная система делает возможным использование гибридных сеток разнотипных элементов, позволяет реализовывать разнообразные модели расчетной области, различные типы граничных условий, а также сложные зависимости коэффициентов уравнений от пространственных координат, времени и искомых функций. Универсальность и робастность разработанного программного комплекса обеспечивается возможностью применения разнообразных методов дискретизации, допускающих использование аппроксимирующих конечных элементов различных типов, в том числе NURBS элементов. Применение последних объединяет геометрическое и конечноэлементное представление расчетной области. Комплекс включает набор унифицированных базовых программных средств, позволяющих выполнять численные исследования для разнообразных физико-математических моделей как фундаментального, так и прикладного характера.
- Построена математическая модель притока флюида к наклонно-горизонтальной скважине, позволяющая решать задачу оценки её продуктивности для реальных нефтяных пластов, обладающих свойством разномасштабности при нелинейном законе фильтрации Форхгеймера. Применение методики прискважинного макроблока снижает требования к мелкости расчётной сетки в призабойной зоне. Использование модели начального приближения, основанной на расчёте с использованием NURBS, позволило сократить число итераций для достижения установления при решении задачи (1)-(3). Проведено исследование характера течения флюида в условиях нелинейного закона фильтрации. Получены оценки области влияния нелинейности. Установлены допустимые и оптимальные размеры макроблока в

зависимости от толщины пласта и точности решения. Модельные расчеты показывают эффективность разработанной методики.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

1. Б. Н. Четверушкин, В. А. Гасилов, С. В. Поляков, М. В. Якововский, И. В. Абалакин, Е.Л. Карташева, И.В. Попов, П. С. Кринов, С. А. Суков, В. Г. Бобков, А. С. Минкин. Пакет прикладных программ GIMM для решения больших задач гидродинамики на многопроцессорных вычислительных системах. - Сборник трудов Всероссийской научно-технической "Параллельные вычисления в задачах математической физики". Изд-во Ростовского Гос.Университета "ЮГИНФО РГУ", 2004, с. 141-158.
2. B. N. Chetverushkin, V. A. Gasilov, S. V. Polyakov, M. V. Iakobovski, E. L. Kartasheva, I. V. Abalakin, I. V. Popov, N. Yu. Romanyukha, S. A. Sukov and A. S. Minkin. CFD Software Project GIMM. Study of Hydrodynamic Problems Via Parallel Computing. – Parallel Computational Fluid Dynamics. Multidisciplinary Applications/Proc. Of the Parallel CFD 2004 Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain (May 24-27, 2004). – Amsterdam – Elsevier B.V. 2005, p. 339-344.
3. Б. Н. Четверушкин, В. А. Гасилов, С. В. Поляков, Е. Л. Карташева, М. В. Якововский, И.В. Абалакин, В. Г. Бобков, А. С. Болдарев, С. Н. Болдырев, С. В. Дъяченко, П. С. Кринов, А. С. Минкин, И. А. Нестеров, О. Г. Ольховская, И. В. Попов, С. А. Суков. Пакет прикладных программ GIMM для решения задач гидродинамики на многопроцессорных вычислительных системах. – Математическое моделирование, 2005г., том 17, номер 6, с. 58-74.
4. B. N. Chetverushkin, V. A. Gasilov, S. V. Polyakov, M. V. Iakobovski, E. L. Kartasheva, A. S. Boldarev, A. S. Minkin. Data Structures and Mesh Processing in Parallel CFD Project GIMM. - ParCo 2005, International Conference on Parallel Computing, Abstracts, p.41.

5. B. N. Chetverushkin, V. A. Gasilov, S. V. Polyakov, M. V. Jakobovski, E. L. Kartasheva, A. S. Boldarev, A. S. Minkin. Data Structures and Mesh Processing in Parallel CFD Project GIMM. - ParCo 2005: Current and Future Issues of High-End Computing, John von Neumann Institute for Computing, p.351.
6. B. Chetverushkin, V. Gasilov, M. Yakobovski, S. Polyakov, E. Kartasheva, A. Boldarev, I. Abalakin and A. S. Minkin. Unstructured mesh processing in Parallel CFD project GIMM. - Parallel Computational fluid dynamics: Theory and applications/Proc. of the Int. Conf. Parallel CFD 2005 Conference, College Park, MD, USA /Ed. by A. Deane, A.Eger, J. McDonald, N. Satofuka, G.Brenner, D.R.Emerson, J.Periaux, D. Tromeur-Dervout. Elsevier Publ., Amstedam, Oxford, 2006, p. 501-508.
7. Е. Л. Карташева, А. С. Минкин, В. А. Гасилов Метод триангуляции составных поверхностей, состоящих из В-сплайн сегментов сложной формы. – Математическое моделирование, 2007 г., том 19, номер 10, с. 44-60.
8. Б. Н. Четверушкин, В. А. Гасилов, С. Н. Болдырев, А. С. Болдарев, Е. Л. Карташева, О. Г. Ольховская, С. В. Дьяченко, А. С. Минкин, С. В. Поляков, М. В. Якобовский. Объектно-ориентированное программирование и организация структур данных для параллельных расчётов комплексных задач гидродинамики. – Приложения к журналу "Открытое образование", с. 40-41.
9. В. А. Гасилов, С. Н. Болдырев, А. С. Болдарев, Е. Л. Карташева, О. Г. Ольховская, С. В. Дьяченко, А. С. Минкин. Об использовании объектно-ориентированных программных средств для решения комплексных задач гидродинамики на параллельных системах. – Сборник трудов Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет: многоядерный компьютерный мир", М.:Изд-во МГУ, 2007 г., с. 196-197.