

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Крамаренко Василия Константиновича «Методы решения уравнения диффузии в средах с контрастными включениями и с учетом особенностей от распределенных источников», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Тема исследования и ее актуальность.

Работа посвящена исследованию методов учета различных особенностей при моделировании диффузионных процессов, и в частности процессов фильтрации однофазной несжимаемой жидкости. Основной результат работы состоит в разработке новых подходов для учета особенности от распределенных источников, а также расчета задач в сильно неоднородных средах.

Я согласен с аргументами соискателя относительно актуальности темы диссертации, сводящимися к тезису, что в настоящее время математическое моделирование процессов, описываемых уравнением диффузии, является важным разделом прикладной математики. При этом наличие различного рода особенностей моделируемого процесса затрудняет получение приближенного решения с приемлемой точностью.

Краткий обзор содержания диссертации.

Диссертация В.К. Крамаренко изложена на 94 страницах и состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы, списка рисунков и списка таблиц.

Введение начинается с краткой характеристики круга приложений, в которых математические модели используют уравнение диффузии при наличии различного рода особенностей (анизотропия, гетерогенность, нелинейное поведение тензора диффузии). При этом упоминаются задачи фильтрации многофазной жидкости, лежащие в основе моделей процессов нефтедобычи, и как частный случай – задачи фильтрации однофазной жидкости, сводящиеся к уравнению диффузии. Далее, обсуждается

актуальность темы и формулируется предмет исследования, состоящий, во-первых, в развитии подхода по использованию аналитических описаний особенностей в сеточной модели, и, во-вторых, в разработке методики для описания процессов диффузии в средах с сильноконтрастными включениями. Далее, введение содержит весьма обстоятельный обзор литературы по теме исследования, включающей, как статьи, посвященные учету особенностей при аппроксимации уравнений диффузии, так и работы, связанные с конструированием эффективных, учитывающих особенности задачи, предобуславливателей в итерационных методах решения сеточных систем. Заканчивается введение информацией о цели работы, решенных задачах, научной новизне, практической значимости, основных выносимых на защиту положениях, апробации работы, публикациях.

В первой главе рассматривается метод учета скважин для численного решения уравнения фильтрации однофазной жидкости. Приводится исходная постановка задачи диффузии с объемными источниками и интегральная постановка в терминах потоков, рассматривается схема нелинейной коррекции (НК-схема), приводится модификация схемы Писмэна, позволяющая использовать ячейки произвольной формы с произвольным расположением скважины внутри. Далее, рассмотрены различные варианты нелинейности в схеме нелинейной коррекции в изотропном случае и в случае анизотропного тензора проницаемости. Также рассмотрены модели с совершенным (перфорация скважины по всей длине) и несовершенным вскрытием пласта. В пункте 1.5 приведен большой набор результатов численных экспериментов для различных физических постановок при разных способах дискретизации расчетной области. Рассмотрены случаи, как одной, так и нескольких скважин. Приводятся данные сравнения полученных результатов с расчетами по нелинейной монотонной двухточечной схеме (НМД-схеме).

Вторая глава посвящена конструированию предобуславливателя в итерационном процессе решения задачи фильтрации однофазной жидкости в смешанной постановке. При этом коллектор предполагается сильно неоднородным. В первых пяти пунктах формулируется исходная задача и различные варианты ее аппроксимации смешанным гибридным методом

конечных элементов с использованием элементов Равьяра-Тома наименьшей степени. Кроме того, в п.2.2 упоминается возможность аппроксимации задачи в смешанной постановке на основе предложенного Ю.А. Кузнецовым метода кусочно-постоянных потоков (PWCF), являющегося своеобразным вариантом разрывного метода Галеркина. Основным во второй главе является п.2.6, в котором конструируется двухуровневый предобуславливатель (ДП) и для которого в случае постоянных шаровых тензоров проницаемости в подобластях устанавливается спектральная эквивалентность исходной матрице с константами эквивалентности независимыми от скачков проницаемости пласта. Далее, приводится блочная модификация метода (БДП), в которой для подобластей со слабо меняющейся проницаемостью предобуславливателем является диагональная матрица. Далее осуществляется экспериментальное исследование разработанных алгоритмов. Приводятся результаты сравнения производительности ДП и БДП с методом Якоби. Кроме того, осуществлена параллельная реализация разработанных методов, и полученные при этом результаты сравниваются с методом ILU из пакета PETSc, алгебраическим многосеточным методом из пакета Trilinos и методом ILU2, встроенным в платформу INMOST.

В заключении в пяти пунктах сформулированы основные результаты исследования. **Список литературы** содержит 93 ссылки.

Краткий анализ диссертации.

В диссертации В.К. Крамаренко предложен способ учета произвольной аналитической функции в методе конечных объемов, и в частности, аналитически заданного поля давления в окрестности скважин в задачах фильтрации однофазной несжимаемой жидкости. В этом смысле можно говорить о получении новых результатов в области **математического моделирования**. Данный подход реализован в виде ряда вычислительных алгоритмов с использованием различных сеток для разных аналитически заданных функций.

Далее, в диссертационной работе предложены новые двухуровневые предобуславливатели (ДП и БДП) в итерационном методе решения стационарной задачи диффузии в сильноконтрастных средах. В

приложении к задачам моделирования нефтяных резервуаров речь идет о процессах фильтрации в сильно неоднородных коллекторах. Построенные предобуславливатели обеспечивают независимость скорости сходимости итерационного процесса от скачков коэффициента диффузии. Таким образом, получены новые важные результаты в области **численных методов**.

И, наконец, в работе представлены результаты по параллельной реализации БДП, с подробным описанием многоядерной системы, на которой проводились эксперименты. Следует отметить важность описания экспериментов на стр. 72 и 73, в котором анализируются результаты сравнения БДП с методами из пакетов PETSc, Trilinos и INMOST. Автор сделал важное замечание, что «хорошая работа» отдельных программ обеспечивается тщательным подбором параметров методов. Видимо имеется в виду, что БДП, с которым идет сравнение, работает, как «черный ящик», и в этом смысле вполне конкурентоспособен лучшим на сегодняшний день предобуславливателям. Разработанные программы внедрены в вычислительную платформу INMOST, и в этом смысле можно утверждать, что получен законченный результат в области **комплексов программ**.

Замечания.

1. Несколько расплывчато сформулирована актуальность исследования. В частности, аргументация актуальности начинается с несколько неудачной, на мой взгляд, фразы: «Актуальность темы данной работы заключается в описании и исследовании двух новых методов корректного учета двух различных особенностей задачи в уравнении диффузии». Вряд ли актуальность может заключаться «в описании и исследовании» чего бы то ни было.

2. В тексте диссертация встречаются термины «многофазная фильтрация», «однофазная задача фильтрации» (стр.4). Думаю, что термины не совсем корректны. Не «многофазная фильтрация», и уж тем более не «однофазная задача», а жидкость многофазная или однофазная.

3. В формуле (1.4) в суммировании используется неудачное обозначение $f_i \in T$, вместо которого следовало бы использовать

обозначение $f_i \subset \partial T$. Кроме того, в начале страницы 13 в комментарии к (1.4) возникло новое обозначение для ячейки: e_t .

4. Схему (1.21) обычно называют пятиточечной, а не двухточечной.

5. На стр.51 упоминается возможность дискретизации системы (2.9) с использованием метода кусочно-постоянных потоков (PWCF). Здесь допущена неточность – следует говорить о дискретизации системы (2.5), когда аппроксимация градиента давления в уравнении Дарси и дивергенции потока в законе сохранения массы осуществляются некоторой специально сконструированной билинейной формой. При этом на стр. 65 фактически имеется ответ на данное замечание – говорится об использовании схемы PWCF для дискретизации именно системы (2.5).

6. Следовало бы привести в автореферате перечень основных результатов исследования.

7. Имеются опечатки. Например, в формуле (2.50) вместо матрицы K_t присутствует матрица K_s .

Резюмирующая часть.

Приведенные выше замечания не затрагивают суть представленного исследования и не снижают его научной значимости. Работа выполнена на высоком научном уровне и содержит важные результаты по всем трем направлениям, указанным в паспорте специальности. Все эти результаты опубликованы в изданиях из списка ВАК, а численные реализации методов внедрены в программную платформу INMOST. Автореферат достаточно полно и точно отражает содержание диссертации.

Считаю, что исследование В.К. Крамаренко вносит существенный вклад в развитие проблематики, связанной как с вычислительным моделированием в области процессов фильтрации, так и с совершенствованием алгоритмов вычислительной алгебры итерационного решения разреженных СЛАУ, порожденных сеточными аппроксимациями уравнений диффузии в сильно неоднородных средах. Представленная диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, и критериям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых

степеней», предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а Василий Константинович Крамаренко заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории математических задач химии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН),
630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6,
рабочий телефон: +7 (383) 330-83-74,
электронный адрес: laev@labchem.sccc.ru,
д.ф.-м.н. по специальности 01.01.07 – вычислительная математика,

профессор


11.11.2019

Юрий Миронович Лаевский

Подпись Ю.М. Лаевского удостоверяю,
Ученый секретарь ИВМиМГ СО РАН
к.ф.-м.н.



Л.В. Вшивкова