

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Капорина Игоря Евгеньевича на диссертацию 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».

Диссертационная работа В.К. Крамаренко посвящена разработке методов, позволяющих эффективно учитывать некоторые особенности задачи диффузии, усложняющие ее численное решение. В работе предложены и исследованы подходы, предназначенные для более эффективного решения задач с распределенными источниками или с высококонтрастными включениями.

Актуальность работы. Уравнение диффузии применяется для описания широкого круга явлений. При их моделировании в задаче диффузии появляются особенности, которые усложняют ее численное решение. Например, в задачах нефтегазодобычи, описываемых уравнением фильтрации, необходимо корректное моделирование скважин. Линеаризованная однофазная стационарная задача фильтрации эквивалентна задаче диффузии, рассматриваемой в данной работе. Также, во многих задачах возникает необходимость решать задачу диффузии с высококонтрастными включениями. Это приводит к необходимости разработки эффективных решателей для систем линейных уравнений с плохо обусловленными матрицами.

Новизна. В работе описывается новая модель взаимодействия распределенного источника и ячейки расчетной сетки, через которую он проходит и схема нелинейной коррекции, позволяющая эффективно учитывать распределенный источник в дискретизации. В работе также предложен новый метод построения параллельного предобусловливателя для линейных систем, возникающих при использовании дискретизации специального вида для уравнения диффузии с высококонтрастными включениями.

Содержание работы

Во *введении* сформулированы актуальность темы диссертации, цели и задачи исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

В *первой главе* диссертации описывается схема нелинейной коррекции для дискретизации потока в методе конечных объемов, а также новая модель взаимодействия распределенного источника и ячейки расчетной сетки, через которую он проходит. Рассматриваются различные функции коррекции для различных вариантов задания коэффициента фильтрации. Методы исследуются численно и сравниваются с другими схемами дискретизации.

Во *второй главе* рассматривается задача диффузии с высококонтрастными включениями. Описывается постановка задачи, а также дискретизация при помощи смешанного гибридного метода конечных элементов. Далее представляются алгоритмы построения двухуровневого и блочно-двухуровневого предобусловливателей, даются теоретические оценки скорости сходимости. Во второй части главы приводятся результаты численных экспериментов, подтверждающие теоретические оценки, а также сравнение параллельной реализации блочно-двухуровневого предобусловливателя с другими эффективными методами предобусловливания, такими как методы декомпозиции области в сочетании с методами неполной факторизации в подобластях и алгебраический многосеточный метод.

В *заключении* приведены основные результаты работы.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов не вызывает сомнений. Предложенные автором подходы исследованы численно, для метода предобусловливания линейных систем приведены теоретические оценки скорости сходимости итерационного процесса, подтвержденные экспериментально. Результаты исследования представлены в рецензируемых изданиях, в том числе, входящих в список ВАК, докладывались на российских и международных научных конференциях.

Практическая и научная ценность результатов работы заключается в:

1. описании и численном исследовании схемы нелинейной коррекции для дискретизации потока в методе конечных объемов;
2. предложении и исследовании новой модели взаимодействия распределенного источника и ячейки расчетной сетки, через которую он проходит;
3. предложении, а также теоретическом и численном исследовании параллельного блочно-двухуровневого предобуславливателя для линейных систем, возникающих при дискретизации уравнения диффузии с высококонтрастными включениями;

4. программной реализации вышеперечисленных методов и включении их в программную платформу для распределенных вычислений INMOST.

Соответствие содержания работы специальности. Содержание и результаты работы полностью соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», поскольку основными результатами работы являются: математическая модель взаимодействия распределенного источника и ячейки расчетной сетки, схема нелинейной коррекции для дискретизации потока в методе конечных объемов и метод построения параллельного блочно-двухуровневого предобуславливателя, а также программная реализация вышеперечисленных методов и включение ее в программную платформу INMOST.

Замечания. Формальные замечания:

- (1) Текст диссертации содержит ряд опечаток в словах, напр., на стр. 10, 13, 44, 58, 80.
- (2) Ошибочно употребляется термин «колокация» (по контексту должно быть «коллокация»).
- (3) Есть формулы, нуждающиеся в пояснении, например, на стр.12 после формулы (1.4) было бы уместно пояснение типа «где $u = -D \text{ grad } p$ является вектор-функцией потока», но такое пояснение дано лишь на стр.48.
- (4) На рисунке 1.1 у вектора нормали указан нижний индекс «e» вместо «f».

Замечания по существу:

- (5) На стр.16 для вывода формул нелинейной коррекции используется функция $\log(r(x,y,z))$, где r представляет собой расстояние от точки (x,y,z) до оси скважины. Далее говорится, что «не накладываемся *никаких ограничений* на прохождение скважины через ячейки расчетной сетки». В буквальном смысле, это невозможно, так как точка сингулярности логарифма (т.е. ось скважины) должна быть достаточно хорошо отделена от грани сетки. В противном случае никакая кубатурная формула, пусть даже 13-го порядка, не поможет правильно построить схему. И действительно, на стр.35, где описывается тестирование случая, когда ось скважины сдвинута относительно центра ячейки, положение оси скважины берется отделенным от границы ячейки не менее, чем на 30% от расстояния между центром и границей ячейки. Таким образом, возникает вопрос о связи минимально допустимого расстояния между осью скважины и границей ячейки со степенью используемой кубатурной формулы (или, вообще говоря, ее точностью). В диссертации этот вопрос не раскрыт никак. В любом случае, *ограничения* на прохождение скважины относительно ячейки *есть* (хотя они существенно ослаблены по сравнению с известными простейшими схемами).

(6) Есть также ряд замечаний по организации численных экспериментов с целью сравнения предлагаемого параллельного блочно-двухуровневого метода предобусловливания с некоторыми известными конкурирующими методами.

Из пояснений к таблицам на стр. 76 – 78 видно, что число неизвестных в системах линейных алгебраических уравнений примерно равно учетверенному числу узлов расчетной сетки. Очевидно, это связано с использованием «смешанного гибридного метода конечных элементов» (см. стр. 51 и далее). Именно для такой дискретизации строится предобусловливатель, предложенный автором, причем существенно используется специфика этой дискретизации. В то же время, та же самая тестовая 2-мерная задача диффузии может быть дискретизирована по стандартной 5-точечной схеме, и порядок системы (а тем более, число ненулей в матрице) будет в четыре раза меньше. Но именно для стандартных дискретизаций (конечнообъемных или конечноразностных) последнего типа разрабатывались и оптимизировались те линейные решатели, с которыми сравнивается соискатель. Поэтому неудивительно, что иногда предлагаемый соискателем решатель обгонял другие методы, ведь он применялся к специально приспособленной системе линейных уравнений, имеющей структурные свойства, невыгодные для конкурирующих методов. Можно предполагать, что весьма узкая область эффективной применимости и потребность в 4-кратном (и это в 2-мерном, а что будет в 3-мерном случае?) увеличении размера задачи, делает маловероятным практическое внедрение предлагаемой методики расчета, например, в современные промышленные симуляторы процессов разработки нефтяных и газовых месторождений.

(7) С одной стороны, нет никаких явных указаний на то, какой именно метод решения линейных систем был применен при тестировании точности схем дискретизации (с нелинейной коррекцией) из первой части диссертации. Также, нет сравнительного анализа систем линейных уравнений, получаемых при использовании известных упрощенных методик аппроксимации и методики с нелинейной коррекцией, предлагаемой автором. В то же время понятно, что линейный решатель, предлагаемый во второй части диссертации, непригоден для решения линейных систем, отвечающих аппроксимациям с нелинейной коррекцией, предлагаемым в первой части.

Общая оценка работы. Вышеприведенные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы, которая представляет собой теоретическое и практическое исследование достаточно высокого уровня во всех компонентах специальности.

Основные результаты по теме изложены в научных статьях, число которых соответствует требованиям ВАК по отношению к кандидатским диссертациям. Апробация результатов подтверждена докладами на российских и международных конференциях.

Содержание автореферата в полной мере отражает основные положения, выводы и результаты диссертации.

Таким образом, диссертация Крамаренко Василия Константиновича является научно-квалификационной работой, содержащей решение задач, имеющих значение для развития соответствующей отрасли знаний, и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
ВЦ ФИЦ ИУ РАН

Капорин Игорь
Евгеньевич



Сведения о лице, предоставившем отзыв:

Ф.И.О.: Капорин Игорь Евгеньевич

Почтовый адрес (служебный): 19333, Москва, ул. Вавилова, 40, ВЦ ФИЦ ИУ РАН, igorkaporin@mail.ru, тел. +7-916-797-13-62

Полное название организации: Вычислительный центр им. Дородницына
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление»
Российской академии наук.

Подпись Капорина Игоря Евгеньевича удостоверяю
Ученый секретарь ФИЦ ИУ РАН

доктор технических наук



Захаров Виктор Николаевич

29.11.2019