

## О Т З Ы В

Официального оппонента – кандидата технических наук Белой Анастасии Александровны на диссертационную работу Грифа Александра Михайловича на тему:

«Разработка методов создания трехмерных геолого-гидродинамических моделей и постобработки многофазных потоков при конечноэлементном моделировании процессов нефтедобычи», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа посвящена **актуальной тематике** построения цифровых моделей нефтяных месторождений с использованием методов трехмерного гидродинамического моделирования в сильно неоднородных пористых средах и разработке соответствующих программных реализаций. Адекватная цифровая модель позволяет с гораздо большей эффективностью вести добычу нефти, строить прогнозы и оптимальные стратегии разработки месторождения.

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Автореферат достаточно полно отражает основные идеи и результаты диссертационной работы. В диссертации рассматриваются все важные аспекты создания цифровой модели, но основное внимание уделяется методам постобработки (балансировки) численных потоков, обеспечивающих для всех конечных элементов баланс объемов втекающей и вытекающей смеси, и методу построения гидродинамической модели по скважинным (геолого-геофизическим) данным. Предложенные методы детально проработаны и обладают научной новизной.

В методе постобработки потоков смеси баланс объемов достигается за счет вычисления корректирующих добавок к численным потокам смеси, которые находятся в результате решения СЛАУ, эквивалентной минимизации функционала баланса с регуляризацией.

Для метода построения по скважинным данным трехмерной модели нефтяного месторождения разработана параметризация, включающая формирование физических и геометрических параметров, которая позволяет строить стартовую модель высокого качества для выполнения автоматической адаптации по истории разработки. Эта модель формируется из пластов и трехмерных неоднородностей, субгоризонтальные поверхности которых описываются сглаживающими сплайнами, найденными в результате минимизации регуляризованного функционала, в котором в качестве штрафов используются добавки с весовыми функциями специального вида. Латеральные границы 3D-неоднородностей формируются по границам ячеек Вороного, которые строятся вокруг скважин и вспомогательных точек, а субгоризонтальные поверхности вычисляются в относительных координатах.

Предложены подходы к сокращению вычислительных затрат при решении задач фильтрации. Они основываются на использовании специального алгоритма выбора регуляризирующих добавок для метода балансировки, а также оригинальных способов формирования по скважинным данным 3D-неоднородностей в пластах месторождения, позволяющих генерировать экономичные несогласованные конечноэлементные сетки.

Рассмотрены примеры построения стартовых трехмерных моделей для месторождений Республики Татарстан и оценка их качества. Представлены результаты применения метода балансировки, в том числе при использовании несогласованных сеток. Проведена оценка влияния эффектов ориентации конечноэлементных сеток. Также проведено сравнение метода балансировки с другой технологией постобработки численных потоков методом проецирования.

В работе приведено описание разработанных подсистем программного комплекса моделирования процессов нефтедобычи. Графический интерфейс пользователя снабжен

интерактивными средствами пре- и постпроцессора, позволяющими удобно работать с 3D-моделью месторождения (загрузка практических данных, создание структурного каркаса, автопостроение 3D-неоднородностей и др.), запускать расчеты и просматривать результаты моделирования (пространственно-временные распределения и данные нефтедобычи).

Диссертационная работа содержит большое количество исследований и численных экспериментов, позволяющих сделать вывод о достаточной верификации методов постобработки многофазных потоков и создания трехмерных моделей месторождений. Это подтверждает **обоснованность и достоверность результатов**, полученных автором. В работе показано, что соответствующее по точности решение было получено без применения метода балансировки только на сетке с многократными вложенными дроблениями. Приведено также сравнение результатов моделирования, полученных с использованием метода проецирования, представленного авторами Wheeler M.F., Sun S., Lee S. и др. в высокорейтинговых журналах. На тестовых задачах и при моделировании реальных месторождений было получено, что предложенный в диссертации метод балансировки является на 1-2 порядка более точным, чем метод проецирования. Была показана корректность применения метода балансировки при расчете на несогласованных сетках: для тестовой задачи отклонения в накопленных отборах нефти при расчетах на согласованной и несогласованной сетках не превысила 0.03%. При моделировании реального месторождения нефти эти отклонения на конец времени разработки составили от 0.1 до 1.5%. Также был проанализирован эффект ориентации конечноэлементных сеток при использовании метода балансировки потоков. Для исходной и повернутой модели различия в результатах расчетов были незначительны как по совокупной добыче нефти, так и по добыче на отдельных скважинах.

Корректность построения по скважинным данным трехмерных моделей для нефтяных месторождений Республики Татарстан, которые были использованы как стартовые в процедуре автоадаптации, была подтверждена хорошим совпадением рассчитанных и практических данных нефтедобычи. Стартовая параметризация модели позволила сделать процесс автоадаптации достаточно быстрым и устойчивым и получить низкую невязку в накопленных объемах нефти: на конец моделирования она составила менее 1.5%.

Предложенные методы построения поверхностей пластов позволили сделать монотонным сглаживание в окрестностях скважин, а алгоритмы формирования по скважинным данным трехмерных неоднородностей адаптированы под использование экономичных несогласованных сеток и резко повышают вычислительную эффективность моделирования.

Разработанные алгоритмы и методы реализованы в виде соответствующих модулей и подсистем программного комплекса моделирования многофазных течений в задачах нефтедобычи.

Этот программный комплекс был применен для построения моделей нефтяных месторождений Республики Татарстан, по которым были построены высококачественные обоснованные прогнозы и оптимальные планы разработки месторождений. Таким образом, разработанные в диссертационной работе методы и алгоритмы имеют высокую практическую ценность.

Основные результаты работы **опубликованы** в 19 работах, включая 3 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 4 публикации, индексируемые в международной системе научного цитирования Web of Science, 11 публикаций, индексируемых в международной системе научного цитирования Scopus. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания**:

1. Решение обратной задачи (автоадаптация) является крайне важным этапом построения цифровой модели месторождения. В работе предложена довольно

оригинальная геометрическая параметризация 3D-неоднородностей, основанная на ячейках Вороного, построенных вокруг скважин и дополнительных точек. Однако в работе не даются рекомендации по выбору дополнительных точек, вокруг которых будут построены дополнительные ячейки Вороного.

2. В работе говорится, что при построении гидродинамической модели используются геолого-геофизические данные, но примеров формирования гидродинамических параметров по геолого-геофизическим данным в диссертации нет.

3. В диссертации приводятся результаты создания трехмерных моделей нефтяных месторождений, содержащих порядка 50-100 скважин. Насколько разработанный метод масштабируем на очень крупные месторождения, содержащие несколько сотен или тысяч скважин?

4. Критерием выхода из алгоритма балансировки численных потоков смеси является малость небаланса во всех элементах сетки (стр. 22, строка 21 алгоритма). При этом могут возникнуть ситуации, когда желаемый уровень малости небаланса не достигается. Как действует алгоритм в таких ситуациях?


Указанные замечания не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа «Разработка методов создания трехмерных геолого-гидродинамических моделей и постобработки многофазных потоков при конечноэлементном моделировании процессов нефтедобычи» является завершенной научно-квалификационной работой, полностью отвечает требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее автор, Гриф Александр Михайлович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент, к.т.н., заведующая лабораторией математического моделирования Акционерного общества «ЕМ-разведка», 630007, Новосибирская обл., г. Новосибирск, ул. Октябрьская Магистраль, 4  
Телефон: +7 (383) 347-47-97  
E-mail: n.belai84@gmail.com

«18» августа 2022 г.

Белая А.А.

Я, Белая Анастасия Александровна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Получил в совет  
19.08.22 

С отзывом ознакомлена  
19.08.2022 