ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Шубенкова Ивана Сергеевича
«Конвекция одно- и многокомпонентных жидкостей в пористых слоях»,
представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

1. **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа посвящена теоретическому и численному исследованию конвективных процессов в пористых средах, насыщенных одно- и многокомпонентными жидкостями. Актуальность темы не вызывает сомнений и обусловлена широким спектром приложений: от задач нефтегазодобычи, гидрогеологии и геотермии до управления тепло- и массопереносом с помощью вибраций. Особое внимание в работе уделено трёхкомпонентным смесям с эффектом Соре, которые, несмотря на возрастающий интерес (в том числе в рамках экспериментов на МКС), остаются малоизученными по сравнению с бинарными системами. Исследование влияния вибраций на устойчивость таких систем, а также моделирование конвекции в реальных геологических структурах (складках) представляет собой важную фундаментальную и прикладную задачу.

В первой главе диссертации исследована задача конвекции трѐхкомпонентной смеси в горизонтальном пористом слое, подогреваемом снизу. Для линейной задачи рассчитана карта устойчивости механического равновесия на плоскости число Рэлея – отношение разделения. Вычисленные границы устойчивости для длинноволновых возмущений и частоты критических возмущений согласуются с результатами длинноволнового анализа. При отрицательных отношениях разделения обнаружена длинноволновая колебательная мода неустойчивости и определен диапазон значений параметров, для которых эта мода является наиболее опасной. При помощи метода конечных разностей найдены численные решения нелинейной задачи.

В главе 2 исследовано возникновение и развитие тепловой конвекции в наклонном пористом слое, насыщенном жидкостью, в поле силы тяжести при строго вертикальном градиенте температуры, когда состояние механического равновесия возможно. Установлено, что при любом угле наклона слоя

продольные валы являются наиболее опасным типом возмущений. Показано, что двумерные возмущения также возможны.

Глава 3 посвящена численному исследованию трехмерных нелинейных режимов конвекции бинарных смесей в трехслойных системах, имитирующих геологические складки. Для исследования используется программный пакет Ansys Fluent. Рассмотрена задача для антиклинальной складки при слабопроницаемых внешних слоях и варьируемых значениях проницаемости внутреннего слоя. Проведено исследование течений при близких значениях проницаемостях слоёв для синклинальной складки.

2. **Научная новизна**

Среди наиболее значимых новых результатов диссертанта выделяются:

– Обнаружение *длинноволновой моды колебательной неустойчивости* трёхкомпонентной смеси в горизонтальном пористом слое. Автором впервые построена полная карта устойчивости и определён диапазон параметров (отношений разделения), в котором эта мода является наиболее опасной.

– Исследование влияния высокочастотных вибраций на конвекцию трёхкомпонентной смеси с учётом вязких членов в уравнениях для пульсаций. Установлено, что вибрации расширяют область существования длинноволновых мод и повышают порог устойчивости для ячеистых возмущений.

– Доказательство (в линейном и нелинейном приближении) того, что за кризис механического равновесия наклонного пористого слоя при вертикальном градиенте температуры ответственны *трёхмерные возмущения в виде продольных валов*. Установлен новый эффект конвективного движения с траекториями частиц внутри валов, которые представляют собой эллипсы, а нормаль к соответствующим плоскостям имеет наклон к оси конвективных валов.

– Проведение прямого численного моделирования (в Ansys Fluent) конвективных движений бинарной смеси в трёхслойных системах, имитирующих антиклинальные и синклинальные геологические складки, с выявлением сложной эволюции структур течения (переход от сквозного течения к продольным валам). Найдены особенности эволюции течения в зависимости от соотношения проницаемостей слоѐв.

3. **Степень обоснованности и достоверности результатов**

Достоверность результатов обеспечивается использованием апробированных математических моделей (Дарси-Буссинеска, осреднение по периоду вибраций), корректной постановкой граничных условий и применением современных численных методов (конечных разностей и конечных объёмов). Автором проведены тесты на сеточную сходимость (таблицы 1.2, 2.1, 2.3, 3.2) и выполнено сравнение нелинейных расчётов с данными линейного анализа устойчивости и предельными случаями, что подтверждает надёжность полученных данных.

4. **Практическая и теоретическая значимость**

Результаты работы углубляют понимание механизмов тепломассопереноса в многокомпонентных средах. Практическая ценность связана с возможностью прогнозирования распределения компонентов (фракций) в нефтеносных пластах, а также с потенциальным управлением устойчивостью течений с помощью вибраций. Моделирование геологических складок приближено к реальным условиям (учёт геотермального градиента, реалистичные параметры пористой матрицы и смеси).

5. **Замечания и вопросы по диссертации**

Несмотря на высокий научный уровень работы, по тексту диссертации и автореферата имеются следующие замечания и вопросы:

1. *О влиянии вязкости в модели вибрационной конвекции.* В разделах 1.3.2-1.3.3 автором вводится параметр, позволяющий учесть вязкость жидкости в уравнениях для пульсаций. В Главе 1 для учета вязкости в пульсациях вводится параметр δ. В Главе 3 при моделировании складок используется классическая модель Дарси-Буссинеска без вибраций. Возможно ли, что при наличии даже слабых естественных вибраций в геологических пластах (например, сейсмического фона) пренебрежение этим параметром может качественно изменить структуру продольных валов?

2. *Идентификация мод неустойчивости на картах*. На картах устойчивости (рис. 1.4, 1.12) присутствуют сложные переходы между модами. Было бы полезно уточнить, наблюдаются ли в окрестности этой точки бифуркации коразмерности 2 (точки пересечения мод) и как это соотносится с физикой

процесса (например, сменой доминирующего механизма — теплового или концентрационного)?

3. *Оценка параметров для трёхкомпонентной смеси*. В Таблице 1.1 приведены параметры для смеси додекана, изобутилбензола и тетралина. Однако в тексте (раздел 1.2.1) указано, что коэффициент температуропроводности для данной смеси неизвестен, и используется типичное значение для жидких смесей. Насколько сильно варьирование этого параметра может повлиять на положение границ карты устойчивости, особенно для колебательных мод, которые чувствительны к числам Льюиса?

4. *Валидация модели Ansys Fluent для трёхслойных систем*. В Главе 3 при моделировании складок не приведено сравнение с аналитическими решениями для предельных случаев (например, для однородного слоя или при равенстве проницаемостей), хотя такие данные могли бы усилить обоснование достоверности. Также вызывает вопрос выбор полигексаэдральной сетки (poly-hexahedron) — проводилось ли сравнение с классическими гексаэдральными сетками для данной геометрии?

5. *Структура течения при малых надкритичностях*. В разделе 2.4.2 (рис. 2.19) показано, что при твёрдых боковых границах и малых углах наклона наряду с основной конвективной ячейкой возникают небольшие вихри у стенок. Не являются ли они следствием условия на твёрдой стенке и как это соотнести с результатами линейной теории для бесконечного слоя?

6. В тексте диссертации имеются неудачные обороты, например на стр. 24 «Монография является расширением…») и на стр. 51 «устойчивость системы» и «переходы системы»), встречаются сложные формульные конструкции (первая строка на стр. 29). В автореферате присутствуют опечатки: в формуле для числа Рэлея (стр. 9) и в определении вибрационного числа Рэлея (лишняя двойка в знаменателе).

Автореферат диссертации Шубенкова И.С. соответствует тексту диссертации по всем основным параметрам (структура, цель, задачи, новизна, защищаемые положения, содержание глав и заключение). Он в полной мере и адекватно отражает основные научные результаты, полученные автором.

Заключение

Высказанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы. Диссертация Шубенкова И.С. представляет собой законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему, содержит новые научные результаты и соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к

кандидатским диссертациям (в частности, пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней»). Автореферат и публикации (6 работ в журналах из списка ВАК, 5 из которых индексируются в Scopus/Web of Science) полностью отражают содержание работы.

Считаю, что Шубенков Иван Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Доктор физико-математических наук, доцент,

заведующий кафедрой теоретической и
компьютерной гидроаэродинамики,

Институт математики, механики

и компьютерных наук им. И.И. Воровича,

Южный федеральный университет

Цибулин Вячеслав Георгиевич

2.11.2026

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а, ИММиКН ЮФУ

Телефон: +7 918 5630856. Электронный адрес: vgcibulin@sfedu.ru

Подпись Цибулина Вячеслава Георгиевича заверяю

Личную подпись Цибулина В.Г.
удостоверяю
Ученый секретарь Совета
Южного федерального университета
Мирошниченко О.С.