**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**
кандидата физико-математических наук
Вяткина Алексея Анатольевича
на диссертационную работу Шубенкова Ивана Сергеевича
«Конвекция одно- и многокомпонентных жидкостей в пористых слоях»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертационное исследование Шубенкова Ивана Сергеевича посвящено актуальной и комплексной проблеме гидродинамики – анализу термоконцентрационных течений в пористых средах, насыщенных одно-, двух- и трехкомпонентными смесями. В центре внимания автора находятся вопросы устойчивости механического равновесия систем при вертикальном температурном градиенте, а также исследование надкритических режимов, определяющих пространственное перераспределение компонентов смеси. Особый интерес представляют результаты, описывающие сложные пространственные структуры течений в областях разной конфигурации.

**Актуальность работы** не вызывает сомнений. Конвективные процессы в пористых средах являются предметом повышенного научного интереса, в частности в связи с задачами о течениях подземных вод и эксплуатации геотермальных резервуаров. В то время как конвекция однокомпонентных жидкостей и бинарных смесей изучена достаточно подробно, поведение систем с тремя и более компонентами исследовано фрагментарно, поскольку это направление гидродинамики находится на этапе активного становления. Учитывая высокую сложность и трудоемкость натурных экспериментов с пористыми средами, приоритетное значение приобретают теоретические подходы, включая аналитические оценки и численное моделирование. Полученные автором результаты востребованы в геофизике и нефтяной промышленности при моделировании фильтрационных течений подземных вод, разработке геотермальных резервуаров и прогнозировании миграции углеводородов в осадочных бассейнах. Кроме того, учет термодиффузионного разделения имеет принципиальное значение для оптимизации технологических процессов в химической промышленности.

В диссертации представлены постановка задачи, описание использованных методов исследования и их обоснование, сформулированы основные результаты. Текст диссертации написан в научном стиле, работа включает введение, три главы, заключение и список литературы (139 наименований). Общий объем диссертации составляет 148 страниц, включая 78 рисунков и 7 таблиц.

**Первая глава** сосредоточена на анализе возникновения конвекции в горизонтальном пористом слое под влиянием эффекта Соре для трехкомпонентной углеводородной смеси. На основе линеаризованной системы уравнений Дарси-Буссинеска автор проводит детальный анализ устойчивости равновесия. К числу важных достижений автора относится обнаружение длинноволновой моды колебательной неустойчивости и построение соответствующих карт режимов. С помощью двумерного нелинейного численного моделирования установлено, что конвекция развивается через прямую бифуркацию, а переходы между режимами при росте

надкритичности сопровождаются гистерезисом. Отдельный раздел главы посвящен исследованию влияния высокочастотных вертикальных вибраций малой амплитуды: доказано, что вибрационное воздействие расширяет область, в которой длинноволновые возмущения наиболее опасны и повышает порог устойчивости для ячеистых возмущений.

**Вторая глава** посвящена трехмерным конвективным режимам в наклонном пористом слое, насыщенном однокомпонентной жидкостью. Линейный анализ устойчивости показал, что наиболее опасными возмущениями во всём диапазоне углов наклона слоя являются продольные валы. Посредством трехмерного прямого численного моделирования (в программном пакете Ansys Fluent) и редукции задачи в рамках двумерного подхода установлено, что конвективные движения носят сложный характер: в системе формируется ненулевая продольная составляющая скорости, из-за чего траектории жидких частиц представляют собой эллипсы, наклоненные под углом к оси валов.

В **третьей главе** рассматриваются трехслойные пористые системы, имитирующие антиклинальные и синклинальные геологические складки земной коры. Методом прямого численного моделирования детально изучено влияние проницаемости слоев на структуру течений при геотермальном нагреве. Показано, что при критических параметрах возникает слабое крупномасштабное течение, при этом рост проницаемости приводит к формированию продольных валов, наложенных на данное течение. Продемонстрировано, что геометрия складки не вносит качественных изменений в структуру возникающих течений.

**Научная новизна** работы определяется фундаментальными результатами:

- Обнаружена длинноволновая мода колебательной неустойчивости в подогреваемом снизу горизонтальном слое пористой среды, насыщенной трёхкомпонентной смесью, с учётом эффекта Соре. Определены параметры, при которых данная мода является наиболее опасной.
- Установлено влияние высокочастотных вертикальных вибраций на смещение границ смены типов неустойчивости, подавление ячеистых мод и структуру возникающих течений.
- Доказано, что кризис равновесия в наклонном пористом слое при любых углах наклона слоя определяется трехмерными продольными валами. При этом обнаружено, что жидкие частицы движутся по эллиптическим траекториям.
- Получены новые данные о структуре термоконцентрационных конвективных течений в многослойных геологических структурах (складках) в зависимости от соотношения проницаемостей слоёв.

**Практическая и теоретическая значимость** результатов работы в частности состоит в том, что полученные данные могут помочь точнее прогнозировать процессы миграции и формирования залежей углеводородов, а также оценить эффективность естественного перемешивания компонент жидкостей в подземных резервуарах. Исследование теплопереноса в пористых слоях актуально для оптимизации работы геотермальных систем и повышения КПД

теплообменников, заполненных зернистыми или пористыми материалами. В работе получены новые данные о термоконцентрационной конвекции жидкостей с различным количеством компонент в полостях различной геометрии при строго вертикальном градиенте температуры.

**Достоверность и обоснованность** выводов подкреплены использованием классических физических моделей, строгим математическим аппаратом, а также сопоставлением численных результатов с аналитическими асимптотиками и известными литературными данными. Автором задействованы надежные численные алгоритмы (методы стрельбы, конечных разностей и конечных объемов), проведены тесты на сходимость сеток.

Основные результаты исследований изложены в 6 печатных изданиях, опубликованных в научных журналах из списка ВАК, 5 из которых также индексируются в международных базах данных Scopus и Web of Science. Материалы диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях.

**Замечания** по содержанию диссертации:

1) В Главе 2 делается вывод о том, что во всём диапазоне углов наклона слоя наиболее опасны трёхмерные возмущения, имеющие форму продольных валов. При этом в работе [107] (Путин, Старикова) показано, что в случае свободной жидкости продольные возмущения проявляются почти во всём диапазоне углов, однако существует диапазон, в котором наиболее опасными оказываются структуры иного типа. Каковы физические причины рассогласования результатов?
2) В Главе 3 угол складки составляет ~152° (с. 108). В геологии антиклинальные и синклинальные складки могут иметь самые разные углы (от пологих до острых). Неясно, почему выбран именно такой угол и насколько качественно результаты (например, переход от длинноволнового режима к продольным валам) зависят от угла складки.
3) В тексте автореферата и диссертации встречаются опечатки: «приемсь» вместо «примесь» (с. 28), «температураопроводности» (с. 29), «свидительствуют» (с. 80), «барродиффузии» (с. 108) и т.д.
4) В уравнениях (1.10) - (1.13) параметр $b$ принят равным 1 (с. 64). В случае нефтяного паста реальное отношение больше 1. Влияет ли этот параметр на полученные карты устойчивости и критические числа Рэлея?

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и не влияют на справедливость основных выводов. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, содержит значительный объем оригинальных данных, полученных с использованием проверенных и надёжных методов.

**Заключение.**

Диссертационная работа Шубенкова И.С. является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлены результаты, вносящие существенный вклад в развитие знаний в области фундаментальной механики жидкости, гидродинамики и тепломассопереноса в пористой среде, расширяют понимание конвективных процессов многокомпонентных жидкостей под действием гравитационного и вибрационного полей. Полученные в диссертации результаты могут помочь точнее прогнозировать процессы миграции и формирования залежей углеводородов, а также оценить эффективность естественного перемешивания компонент жидкостей в подземных резервуарах. Таким образом, полученные автором диссертации результаты имеют существенное значение для механики жидкости, газа и плазмы в области конвекции многокомпонентных смесей в пористых средах.

**Автореферат** полностью соответствует содержанию диссертации и отражает ее основные положения.

Таким образом, представленная диссертационная работа «Конвекция одно- и многокомпонентных жидкостей в пористых слоях» удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор — Шубенков Иван Сергеевич — заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

**Официальный оппонент**

Вяткин Алексей Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики и технологии ФГБОУ ВО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет»; адрес: 614990. г. Пермь, ул. Сибирская, д. 24.
Тел.: +7(904)848-13-43
e-mail: vjatkin_aa@pspu.ru
https://pspu.ru/

«3» ноября 2026 г. _____ Вяткин Алексей Анатольевич

Подпись Вяткина А.А. заверяю

Учёный секретарь ПГГПУ _____ Гранкина Елена Николаевна