ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИПМех РАН)

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва , 119526
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735
ИНН/КПП 7729138338/772901001

29.10.2026 № 11504/01-2173.1-356

На № 337/01-м72 от 03.07.2026

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУН ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИПМех РАН)

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

С.Е. Якуш

«29» октября 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук» на диссертацию **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»

Работа посвящена комплексному теоретическому исследованию нелинейных режимов конвекции одно- и многокомпонентных жидкостей в горизонтальном и наклонном пористых слоях при вертикальном градиенте температуры, включающее трёхмерное прямое численное моделирование для многокомпонентной смеси, исследование условий устойчивости механического равновесия на основе линейной и нелинейной теории устойчивости, учёт эффекта термодиффузии и влияние высокочастотных вертикальных вибраций малой амплитуды на конвекцию в пористой среде. В работе использовались как линейный анализ устойчивости, так и методы прямого численного моделирования на основе полных уравнений Навье-Стокса. Особое внимание уделено пространственной структуре и интенсивности конвективных течений, формирующихся после потери устойчивости состояния механического равновесия.

Актуальность темы диссертационной работы.

Конвективные процессы в пористых средах являются предметом повышенного научного интереса в частности в связи с задачами о течениях подземных вод и эксплуатации геотермальных резервуаров. Задачи конвекции многокомпонентных жидкостей в пористых средах особенно актуальны, когда речь идёт об описании движения нефти в недрах земли. Благодаря наличию геотермального градиента, в нефтеносных пластах имеют место конвективные, а также диффузионные и термодиффузионные процессы. В

промышленности эффект термодиффузии используется для разделения изотопов или фракций жидких или газовых смесей на отдельные компоненты в термогравитационных колоннах. Конвективные процессы в однокомпонентных жидкостях и бинарных смесях достаточно полно исследованы, в то же время количество работ, посвященных трёхкомпонентным и более сложным системам, невелико, поскольку данное направление только в настоящее время начинается активно развиваться. При этом экспериментальное изучение течений жидкостей в пористых средах является сложным, поэтому необходимо использовать теоретические методы. Данная работа направлена на изучение конвективных процессов, в пористых слоях, насыщенных одно- и многокомпонентными жидкостями, при вертикальном градиенте температуры. Рассматриваются устойчивость механического равновесия и надкритические режимы конвекции, способные существенно повлиять на распределение компонентов смеси. Особое внимание уделяется структуре конвективных течений, которая может сильно зависеть от конфигурации слоя, угла его наклона, нагрева и физических параметров смеси.

Научная новизна работы заключается в том, что работы по исследованию термоконцентрационной конвекции бинарных и трёхкомпонентных жидкостей в полостях различной геометрии под действием строго вертикального градиента температуры (геотермального) практически отсутствуют.

Наиболее существенные результаты работы соискателя можно сформулировать следующим образом. Обнаружена длинноволновая мода колебательной неустойчивости трёхкомпонентной смеси с эффектом Соре в подогреваемом снизу горизонтальном пористом слое. Найден диапазон параметров, в котором эта мода является наиболее опасной. Получена карта устойчивости, определены характер возбуждения конвекции и характеристики надкритических конвективных режимов. Выявлено, что воздействие на данную систему высокочастотных вертикальных вибраций малой амплитуды приводит к расширению области параметров, в которой длинноволновые возмущения являются более опасными. Показано, что вибрации повышают устойчивость механического равновесия для ячеистых возмущений и снижают частоту наиболее опасных колебательных возмущений.

Установлено, что за наступление кризиса механического равновесия наклонного слоя пористой среды, насыщенной однокомпонентной жидкостью, при вертикальном градиенте температуры, при любых углах наклона слоя ответственны трёхмерные возмущения, имеющие форму продольных валов. Обнаружено, что траектории частиц жидкости внутри каждого конвективного вала представляют собой эллипсы. Нормаль к плоскости, в которой лежат эти эллипсы, перпендикулярна вектору силы тяжести и

наклонена под некоторым углом к оси валов. По мере увеличения надкритичности этот угол увеличивается.

Определены условия возникновения конвекции, а также структура и интенсивность конвективных движений, возникающих после потери устойчивости механического равновесия в насыщенных бинарными смесями пористых слоях, имитирующих антиклинальные и синклинальные геологические складки, под действием геотермального градиента.

Достоверность полученных данных и обоснованность выводов основывается на использовании проверенных методов, а также соответствии результатов численных расчётов аналитическим формулам (в предельных случаях) и результатам других авторов. Для выполнения расчетов использовались известные и хорошо зарекомендовавшие себя в гидродинамических задачах численные методы (методы стрельбы, конечных разностей, конечных объёмов). В ряде случаев были получены близкие результаты при использовании различных численных методов. Расчетные алгоритмы верифицировались с использованием различных численных схем. Проводился анализ сходимости результатов при изменении шага расчётной сетки.

Научная значимость работы обусловлена широким спектром практических применений теории конвективной устойчивости, в частности при моделировании фильтрации подземных вод, эксплуатации геотермальных резервуаров, добыче углеводородов и т.д. Получены новые данные о термоконцентрационной конвекции жидкостей с различным количеством компонент в полостях различной геометрии при строго вертикальном градиенте температуры.

Практическая значимость результатов работы, в частности, состоит в том, что они расширяют представления о распределении примесей, процессах миграции и течениях углеводородов в системах, приближенных к геологическим нефтеносным пластам.

Личный вклад автора подробно обозначен и обоснован.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 148 страниц, включая 78 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает в себя 139 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описаны цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, указан личный вклад автора, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

Первая глава посвящена изучению возникновения и нелинейных режимов вызванной эффектом Соре конвекции трёхкомпонентной жидкости в горизонтальном

пористом слое, нагреваемом снизу. Представлен полный подробный, охватывающий зарождение данной тематики и современные исследования в этой области. Аналитически и численно исследуется линейная устойчивости состояния равновесия системы, находящейся в статическом поле тяжести, а также проводится численное исследование нелинейных режимов конвекции с использованием метода конечных разностей. В дополнение к этому, проводится линейное и нелинейное исследование влияния вибраций на данную систему. Вибрации предполагаются высокочастотными и малоамплитудными, их направление параллельно градиенту температуры.

Во второй главе рассматриваются трёхмерные режимы конвекции в наклонном пористом слое под действием вертикального градиента температуры. Аналитически и численно исследуется линейная устойчивость состояния равновесия. Трёхмерные нелинейные режимы конвекции, возникающие после потери устойчивости состояния равновесия, исследуются численно с использованием программного пакета Ansys Fluent. Также, полная трёхмерная задача сводилась к двумерной в плоскости xy с аналитическим выражением для z-компоненты скорости, что упрощает задачу и позволяет провести детальное изучение структуры конвективных течений.

В третьей главе представлены результаты численного исследования трёхмерных нелинейных режимов конвекции бинарных смесей в трёхслойных системах, имитирующих геологические складки. Для исследования используется программный пакет Ansys Fluent. Исследуется геометрия антиклинальной складки при низкопроницаемых внешних слоях и высокопроницаемом внутреннем слое (варьируется значение проницаемости внутреннего слоя), а также геометрия синклинальной складки при близких проницаемостях внешних слоёв и внутреннего слоя (варьируется проницаемость всех слоёв).

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Содержание автореферата соответствует цели, задачам, основным выводам диссертационной работы и адекватно и полно передает содержание диссертации.

По **содержанию диссертации есть несколько замечаний и вопросов:**

1. В задаче главы 1, посвященной конвекции трехкомпонентной смеси с учетом эффекта Соре, рассматривается коэффициент термодиффузии D_T (стр. 27). Однако в уравнение переноса примесей (1.3) входит комбинация $C_0(1-C_0)D_T$, обозначенная на стр. 27 как D_T', причем величина D_T' также называется коэффициентом термодиффузии. Видно, что D_T' варьируется в диапазоне $[0, 0.25\ D_T]$, то есть, всегда существенно меньше D_T. В диссертационной работе следовало бы дать пояснения относительно определения и использования двух коэффициентов термодиффузии.

Следовало бы также указать, на основе каких физических соображений и исходя из каких литературных источников применяется формула, связывающая D_T' и D_T.

2. На стр. 78 во введении к задаче главы 2 сообщается: «В отличие от классической задачи Рэлея-Бенара, в бесконечном плоском слое, наклонённом под углом к горизонту, в случае постоянных разных температур на границах при любой разности температур возникает стационарное течение». Здесь, вероятно, автор имел в виду, что возникает конвективное течение, а не стационарное, поскольку при очень большой разности температур течение может быть нестационарным.
3. Известно, что существует решение классической задачи об устойчивости механического равновесия жидкости в горизонтальном пористом слое при подогреве снизу, называемой задачей Хортона-Роджерса-Лэпвуда (Horton-Rogers-Lapwood); решение этой задачи содержится, например, в ссылке [18] из списка литературы диссертации. В задаче главы 2, посвященной режимам тепловой конвекции в наклоненном слое, при угле наклона $\alpha=\pi/2$ слой становится строго горизонтальным. Дают ли решения, полученные в диссертационной работе, переход к решению задачи Хортона-Роджерса-Лэпвуда при $\alpha=\pi/2$? Этот вопрос автором не обсуждается.
4. На стр. 90 указана пористость $\phi = 0{,}6$ для песчаника, хотя обычно пористость песчаника не превосходит величины 0,3.
5. В задаче главы 3 о режимах термоконцентрационной конвекции в многослойных пористых системах было бы полезно указать число Рэлея-Дарси для внешних слоев и для внутреннего слоя при различных значениях проницаемости, поскольку этот параметр является одним из основных, характеризующих конвективное течение.
6. В работе неоднократно говорится о прямой бифуркации, например, «конвекция возбуждается путём прямой бифуркации», «при всех углах наклона слоя имеет место прямая бифуркация», «при постепенном повышении числа Рэлея происходит переход к прямой бифуркации», но не уточняется к какому типу прямой бифуркации происходит переход: к циклической периодической прямой бифуркации Андронова-Хопфа или стационарной вилообразной бифуркации?
7. В главе 3 представлены длительные численное решения нестационарной задачи о тепломассопереносе в синклинальной складке, но в работе не сказано какой был временной шаг и порядок точности по времени в схеме расчётов.

Работа аккуратно оформлена и написана хорошим грамотным научным языком, но, к сожалению, в тексте встречаются мелкие опечатки, например, на страницах: 35, 37, 43.

Заключение.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Сделанные выше замечания не умаляют достоинства научных результатов диссертации, а носят рекомендательный или уточняющий характер и не влияют на общую высокую положительную оценку работы. 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. Основные результаты научно-квалификационной работы 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, выносимые на защиту, прошли апробацию на авторитетных конференциях.

Таким образом, диссертационная работа Шубенкова И.С. по актуальности, научной новизне, основным положениям, научной, практической значимости и достоверности, по содержанию и оформлению полученных результатов соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Шубенков Иван Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы».

Отзыв на диссертацию подготовлен на основании заключения совместного заседания научных семинаров: «Прикладная механика сплошных сред» (руководитель: А.Н. Рожков), «Механика реагирующих систем» (руководители: А.Д. Полянин, С.Е. Якуш), «Механика жидкостей» (руководитель: Ю.Д. Чашечкин) Института проблем механики им.

А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (протокол заседания объединённого семинара от «29» октября 2026 г.).

Председатель совместного заседания научных семинаров: «Прикладная механика сплошных сред», «Механика реагирующих систем», «Механика жидкостей» ФГБУН ИПМех РАН: заведующий лабораторией механики сложных жидкостей, д.ф.-м.н. по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы
119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101
тел.: +7(495)434-33-52
e-mail: rozhkov@ipmnet.ru

Рожков Алексей Николаевич

Отзыв подготовили:
Старший научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей ФГБУН ИПМех РАН, к.ф.-м.н. по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы
119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101
тел.: +7(495)433-34-97
e-mail: fai@ipmnet.ru

Федюшкин Алексей Иванович

Ведущий научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей ФГБУН ИПМех РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы
119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101
тел.: +7(495) 434-20-70
e-mail: soboleva@ipmnet.ru

Соболева Елена Борисовна

Сведения об организации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук». Адрес: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101.
Телефон: +7(495)434-32-38. E-mail: ipm@ipmnet.ru. Web-сайт: https://ipmnet.ru/

Подписи А.Н. Рожкова, А.И. Федюшкина и Е.Б. Соболевой удостоверяю:
Ученый секретарь ИПМех РАН, к.ф.-м.н.

_____ / М.А. Котов «__29_» _октября___ 2026 г.