

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.479.05,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 05 октября 2023 г. № 9

О присуждении Юлмухаметовой Регине Рафисовне, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование нестационарного течения дисперсных систем в плоских каналах различной геометрии» по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 6 июля 2023 года (протокол заседания № 4) диссертационным советом 24.2.279.05, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), приказ № 520/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Юлмухаметова Регина Рафисовна, 27 декабря 1993 года рождения. В 2017 году соискатель окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный университет» по направлению подготовки 03.04.02 Физика, профиль: Моделирование нефтегазовых процессов с присвоением квалификации Магистр. В 2021 г. окончила аспирантуру по очной форме обучения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный университет» по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика,

профиль: Механика жидкости, газа и плазмы с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь». Диплом об окончании аспирантуры выдан Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Башкирский государственный университет» в 2021 г.

Работает в должности младшего научного сотрудника управления научно-исследовательских работ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре прикладной физики Физико-технического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ковалева Лиана Ароновна, заведующий кафедрой прикладной физики Физико-технического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Научный консультант – кандидат физико-математических наук, доцент Мусин Айрат Ахматович, доцент кафедры прикладной физики Физико-технического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Официальные оппоненты:

1. Мусакаев Наиль Габсалямович, доктор физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, директор;

2. Моисеева Елена Флоридовна, кандидат физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», горно-нефтяной факультет, кафедра разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений, доцент;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, в своем положительном отзыве, подписанном Галимзяновым Маратом Назиповичем, кандидатом физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), и.о. директора, старшим научным сотрудником лаборатории механики многофазных систем Института механики им. Р.Р. Мавлютова, Ульяной Олеговной Агишевой, кандидатом физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), старшим научным сотрудником лаборатории механики многофазных систем Института механики им. Р.Р. Мавлютова и утвержденном руководителем, доктором биологических наук, профессором Мартыненко Василием Борисовичем, указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, результаты которой имеют большое и актуальное прикладное значение и могут быть востребованы на предприятиях нефтедобывающей промышленности и смежных с ней отраслях производства. Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года (с последующими изменениями).

Соискатель имеет 16 опубликованных работ. Из них 2 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации; 4 включены в базу данных Scopus; 1 – в журнале, входящем в базу данных RSCI, 9 – в изданиях,

входящих в РИНЦ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Ковалева Л.А. Численное моделирование ламинарного течения суспензии в плоском канале // Вестник Башкирского университета. – 2021 – Т. 26. – №2. – С. 281-286. <https://doi.org/10.33184/bulletin-bsu-2021.2.2>.

2. Тухбатова Э.Р., Мусин А.А., Юлмухаметова Р.Р., Ковалева Л.А. Исследование влияния тепловой конвекции на процесс разрушения водонефтяной эмульсии при СВЧ воздействии // Вестник Башкирского университета. – 2017. – Т. 22. – № 4. – С. 930-935.

3. Юлмухаметова Р.Р., Мусин А.А., Валиуллина В.И., Ковалева Л.А. Математическое моделирование течения суспензии в системе пересекающихся трещин // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2023. – Т. 26. – № 1. – С. 201-211. <https://doi.org/10.33048/SIBJIM.2023.26.118>

4. Iulmukhametova R.R., Musin A.A., Kovaleva L.A. Mathematical modelling of a laminar suspension flow in the flat inclined channel // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 2057. – P. 012044. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012044>

5. Zamula Y.S., Iulmukhametova R.R., Musin A.A., Shashkov A.V., Kovaleva L.A. Experimental and numerical modeling of a viscous incompressible fluid flow with dispersed particles in a rectangular channel // Journal of Physics. – 2019. – V.1359. – P. 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1359/1/012039>

6. Iulmukhametova R., Musin A., Kovaleva L. Mathematical modeling of the flow of viscous incompressible fluid with suspended particles in flat inclined channel // Advanced Problem in Mechanics II. APM 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2022. – P. 23-32. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_37

7. Valiullina V., Zamula Y., Mullayanov A., Iulmukhametova R., Musin A., Kovaleva L. Experimental and numerical study of the water-in-oil emulsion thermal motion in rectangular cavity with a heated bottom // Advanced

Problem in Mechanics II. APM 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2022. – P.117-125. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92144-6_9

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущей организации – Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) Для оценки вклада конвективного теплообмена в процесс динамики расслоения дисперсной системы при контактном нагреве желательно привести интегральные характеристики, например, интенсивность теплообмена. 2) Задача динамики малоцентрированной дисперсной системы в условиях тепловой конвекции решалась численно методом контрольного объема в программном комплексе OpenFOAM. Валидация программного кода проводилась на результатах из литературных источников и приводится источник: Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с. Однако в работе не указано, как именно проводилась верификация кода. Для верификации программного кода, при решении задач тепловой конвекции, принято использовать эталонные решения («benchmark solutions»), например, в выбранной геометрии работу Quere P. Le, Roquefort T.A. De. Computation of natural convection in two dimensional cavities with Chebyshev polynomials // J. Comput. Phys. 1985. Vol. 57, № 2. P. 210-227. 3) В расчётах с использованием схемы «закрытого основного канала» в разделе 3.3 получен результат, свидетельствующий о том, что частицы «диспергированной фазы» проникают на значительную глубину в область основного канала (Рис. 3.3.4 и Рис. 3.3.5). Представленное автором объяснение на с.90 не отвечает на возникающий вопрос о механизме такого проникновения. 4) На рис. 3.1.2, б - 3.1.5, б концентрация частиц на границах области по данным математического моделирования отклоняется от экспериментальных точек. Этот результат

требует объяснения. 5) В соответствии с анализом результатов, представленных на рис. 3.1.2 - 3.1.5, автор на с. 65 делает вывод: «Во всех случаях наблюдается миграция частиц диспергированной фазы от стенок к центру». Что означает формирование картины распределения диспергированной фазы симметричной относительно центра канала. Данный результат получен при нулевом угле наклона. Однако, уже на рис. 3.2.2 б видим совершенно иную картину. На этом рисунке диспергированная фаза оседает на нижней стенке и имеет несимметричное распределение концентрации частиц по сечению канала. С чем связано такое различие результатов при одинаковых постановках? 6) В тексте диссертации и автореферате есть ряд неточностей и опечаток (С. 12, 34, 35, 64, 79, 94, 97 и т.д.).

2. Официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, директора Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук Мусакаева Наиля Габсалямовича. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1) При анализе первой главы диссертации стоит обратить внимание на иногда противоречивые утверждения автора, которые связаны с недостаточно полным описанием условий, при которых проводились эксперименты или расчеты в обсуждаемых литературных источниках. Например, на стр. 23 автор пишет «... для любой постоянной ширины трещины наклон трещины снижает скорость оседания проппанта ...». В следующем абзаце утверждается обратное: «... После увеличения угла наклона проппант оседал гораздо быстрее, образуя дюны возле точки закачки ...». Очевидно, указанное противоречие возникло из-за того, что не приведено, какой был наклон каналов (положительный или отрицательный) в каждом из рассматриваемых случаев. 2) В работе проведено исследование динамики дисперсной системы в условиях вынужденной и естественной конвекции применительно к проблеме эффективного расслоения водонефтяной эмульсии. При постановке задачи принималось, что дисперсная система

представляет собой вязкую жидкость и взвешенные в ней твердые сферические частицы одинакового размера. Такое допущение при рассмотрении течения водонефтяной эмульсии является, на мой взгляд, весьма сильным, т.к. при этом не могут быть учтены процессы коалесценции или дробления капель, распределение капель по размерам, отклонение формы дисперсных частиц от сферической и т.п. Поэтому соискателю для задачи эффективного расслоения водонефтяной эмульсии необходимо было очертить границы применимости предлагаемой математической модели и полученных результатов численного исследования.

3) В области формирования плотного осадка уравнение (2.1.3), на мой взгляд, не является полным. Действительно, правая часть данного уравнения должна соответствовать взятой с отрицательным знаком дивергенции полного потока диспергированных частиц, равного произведению вектора скорости оседания u_{sed} на величину объемной доли частиц C в данной точке пространства. При раскрытии производной произведения соискатель оставила в правой части уравнения (2.1.3) лишь одно слагаемое $u_{sed}\nabla C$, что справедливо только в случае, если второе слагаемое много меньше вышеприведенного. С учетом выражения (2.1.4) для скорости оседания частиц такое пренебрежение вторым слагаемым допустимо при малых значениях величины C . Здесь стоит отметить, что нарушение применимости модели в узкой области формирования плотного осадка не приводит, вероятно, к существенному искажению рассчитываемой динамики осаждения частиц, однако требует сравнения результатов с решениями более точных, хотя и более сложных, моделей, например, с решением модели, использованной диссертантом в третьей главе диссертации.

4) Не совсем корректно сформулирован второй вывод, в котором указано, что «... Увеличение числа Ra (Рэлея) ведет к возникновению термоконвективных потоков в среде, препятствующих оседанию частиц ...». Во-первых, рост какого-либо числа не может приводить к возникновению или интенсификации процесса. Во-вторых, термоконвективные течения присутствуют и при малых числах Рэлея (меньших 10^4), но в этом случае они не препятствуют расслоению системы «жидкость - дисперсные частицы». Также соискателю

необходимо было провести расчеты в случае отсутствия конвективного течения, чтобы оценить его роль в изучаемом процессе. 5) В третьей главе расчетным путем показано, что растет значение концентрации дисперсных частиц в центре канала. Это связано, как полагает автор, с формированием параболического профиля течения и с миграцией частиц от стенок к центру канала под действием сдвиговых напряжений потока. Такое предположение о действии сдвиговых напряжений потока на миграцию частиц к центру канала диссертанту следовало бы более подробно обосновать, проведя и представив расчеты при варьировании соответствующих параметров системы.

3. Официального оппонента, кандидата физико-математических наук, доцента, доцента кафедры разработки и эксплуатации газовых и нефтегазоконденсатных месторождений горно-нефтяного факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» Моисеевой Елены Флоридовны. Отзыв положительный.

Имеются замечания: 1. При описании математической модели процесса течения малоцентрированной дисперсной системы в плоском горизонтальном канале для скорости оседания частиц диспергированной фазы используется формула (2.1.4). Следует обосновать применение в модели этой формулы. 2) При записи начальных и граничных условий используются индексы: atm , in , out , $wall$, Γ , $B\Gamma$ и др. значение которых следует пояснить. 3) При приведении системы уравнений математической модели процесса динамики малоцентрированной дисперсной системы в условиях тепловой конвекции к безразмерному виду желательно указать характерные масштабы. 4) В математической модели процесса динамики концентрированной дисперсной системы в плоском канале используются эмпирические коэффициенты и функции, следует пояснить модельные или физические обоснования их выбора.

4. Доктора физико-математических наук, профессора РАН, главного научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» Сибирского

отделения Российской академии наук Пахомова Максима Александровича. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) Нет обоснования использования одножидкостного подхода без учета влияния дисперсной фазы на динамику и теплообмен в двухфазном ламинарном потоке в Главе 2. Не указаны параметры применимости и ограничения, разработанных диссертантом математических моделей. 2) В автореферате не приведено данных по параметрам несущей и дисперсной фазы в суспензии и эмульсии. Также не приведены данные по диаметру сферических твердых частиц. 3) Не приведено данных по вычислительным процедурам и по проверке полученных численных решений на их независимость от количества вычислительных ячеек.

5. Доктора физико-математических наук, доцента, главного специалиста отдела гидродинамических скважин Общества с ограниченной ответственностью «РН-БашНИПИнефть» Чиглинцевой Анжелины Сергеевны. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) В автореферате отсутствует оценка влияния нестационарных процессов при моделировании течения дисперсных систем в каналах. 2) Из автореферата непонятно, как были получены экспериментальные данные. Здесь стоило привести краткое описание экспериментальной установки и агентов, образующие дисперсионную систему. 3) На стр. 8, 10 и 11 повторяется описание физических величин. 4) Параметр β на стр. 10 и стр. 12 имеет двойной смысл: в одном случае это коэффициент теплового расширения, а в другом - эмпирический коэффициент. 5) Из автореферата непонятно, какие ограничения (диапазоны параметров, характеризующие как дисперсную систему, так и геометрию канала) существуют у численной модели, предназначенной для прогнозирования течения дисперсной системы в каналах различной геометрии. 6) Третий вывод в автореферате содержит только качественную картину исследований. Здесь стоило привести количественное соотношение между степенью увеличения угла наклона канала и протяженностью фронта движения частиц.

6. Кандидата физико-математических наук, доцента кафедры «Разработка и эксплуатация газовых и нефтегазоконденсатных месторождений» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» Малышева Виктора Леонидовича. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) В разделе 2.1 рассмотрено сопоставление результатов численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM с результатами эксперимента (рисунок 1). Хотелось бы увидеть больше деталей данного сопоставления, т.к. наблюдается некоторое расхождение результатов в левой части канала. 2) В разделе 2.2 рассмотрены результаты исследования влияния тепловой конвекции на расслоение дисперсной системы в поле гравитационных сил. Из постановки задачи и результатов моделирования (рисунок 2) не совсем понятно решалась 2-х или 3-х мерная задача? 3) Позволяют ли полученные результаты в работе моделировать динамику движения жидкостей ГРП в трещине с заданным типоразмером пропанта (например, Mesh 8/16, 12/20, 16/20, 20/40 и т.д.)?

7. Доктора физико-математических наук, профессора, заведующего научно-исследовательской лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Шеремета Михаила Александровича. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) Краевые задачи решались методом контрольного объема в пакете OpenFOAM, однако в автореферате отсутствует информация о типах и размерах используемых сеток, а также о том, проводился ли анализ сеточной сходимости. 2) Из автореферата неясно, какой решатель использовался при решении каждой конкретной задачи. Нет информации о методах решения представленных систем дифференциальных уравнений.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой профессиональной квалификацией, наличием

публикаций по проблематике, связанной с темой диссертации, компетенцией в вопросах, имеющих отношение к теме работы. Ведущая организация и оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– **построены** математические модели неизотермического расслоения дисперсной системы в условиях термоконвективных течений жидкости и изотермического течения дисперсной системы в наклонных и перекрестных каналах с учетом относительного движения фаз, гравитационных сил и функции стесненного осаждения частиц в одножидкостном приближении;

– **показано**, что при значениях числа Рэлея (Ra) меньше, чем 10^4 наблюдается полное расслоение системы в поле гравитационных сил. С увеличением значения числа Ra наблюдается интенсификация термоконвективных потоков в среде, которые препятствуют оседанию диспергированных частиц;

– **получен** диагностический график, позволяющий определить возможность оседания диспергированных частиц в жидкости в зависимости от характерных безразмерных параметров Архимеда (Ar) и Рэлея (Ra);

– **установлено**, что расстояние, на которое продвигается фронт частиц, нелинейно уменьшается с увеличением угла наклона канала и увеличивается с ростом соотношения чисел Рейнольдса для течения дисперсной системы (Re) и потока диспергированных частиц (Re_p);

– **показано**, что, если скорость течения дисперсной системы в канале меньше или сопоставима со скоростью оседания частиц, образуется вал осевших частиц преимущественно в первой половине или в середине канала, соответственно;

– **выявлено**, что при течении дисперсной системы в перекрестном канале если торец основного канала открыт для несущей фазы, то степень заполнения канала выше, чем при закрытом торце;

– **получено**, что эффективность заполнения основного канала твердыми частицами с ростом соотношения характерных чисел Рейнольдса Re/Re_p снижается, а с увеличением длины вторичного канала – растет.

Теоретическая значимость заключается в расширении имеющихся теоретических представлений о течении дисперсных систем в каналах сложной геометрии. Результаты могут быть использованы для создания новых физически обоснованных моделей многофазного течения в каналах, а также для тестирования и модификации уже существующих моделей.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что представленные в работе математические модели могут быть использованы для предсказания поведения дисперсных систем в наклонно-направленных и перекрестных каналах, например, в нефтедобывающей отрасли для решения проблем, связанных с транспортировкой мелких твердых частиц в трещинах, образовавшихся вследствие применения гидравлического разрыва пласта для увеличения нефтеотдачи.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

– **исследование основано** на применении фундаментальных уравнений механики многофазных сред при математическом моделировании рассматриваемых процессов, а также на физической и математической непротиворечивости в рамках физических законов;

– **установлено** согласование с имеющимся в литературе экспериментальными данными.

Личный вклад соискателя состоит в: участии в постановке задач и численной реализации математических моделей; проведении расчетов и анализа полученных результатов; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации было высказано следующее замечание: В работе приведено мало данных о верификации математической модели с аналитическими решениями и экспериментальными данными для случаев наклонно-направленных и пересекающихся каналов. Необходимо акцентировать на этом внимание при проведении численных расчетов.

Соискатель Юлмухаметова Р.Р. ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы и согласилась с замечанием.

На заседании 05.10.2023 г. диссертационный совет принял решение: за научное исследование течений дисперсных систем в каналах различной геометрии, имеющее важное значение для развития теоретических представлений в области механики многофазных систем и ее приложений, присудить Юлмухаметовой Регине Рафисовне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 6 докторов физико-математических наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председательствующий
заседания

д.ф.-м.н., профессор



Шарафутдинов Рамиль Файзырович

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.ф.-м.н., доцент

Киреев Виктор Николаевич

05 октября 2023 г.