

О Т З Ы В

официального оппонента

канд. физ.-мат. наук, доц. **Насибуллаевой Эльвиры Шамилевны**
на диссертационную работу **Галеевой Дилары Рустэмовны**
«Моделирование одно- и двухфазных неизотермических течений
термовязких жидкостей в каналах», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9.
Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность работы

Исследование динамики течения жидкости с аномальной зависимостью вязкости от температуры в различных каналах при наличии теплообмена на их стенках, а также изучение поведения капель вязкой жидкости в потоке термовязкой жидкости, необходимо для установления особенностей развития процессов в технологических установках и решения медико-биологических задач, где температура играет существенную роль. Помимо понимания фундаментальной природы данных процессов, которое позволит объяснить ранее обнаруженные или выявить новые гидродинамические эффекты, значительный интерес вызывают и их практические применения в различных областях промышленности и медицине. Так, например, в нефтяной промышленности при деэмульсации нефти наличие бронирующей асфальтеновой оболочки вокруг капель воды затрудняет данный процесс, и для эффективного разрушения оболочки применяется нагрев жидкости; в медицине в последнее время большое внимание уделяется разработке термочувствительных систем доставки лекарств в организм, когда активное вещество высвобождается при изменении температуры; для формирования и стабильности эмульсий, применяемых в химическом производстве, косметической и пищевой промышленности и пр. также изменение температуры играет важную роль. Для эффективного применения на практике процессов, возникающих при одно- и двухфазном течении термовязкой жидкости, и обеспечения их стабильности, необходимо подробно изучить влияние температуры на физические свойства данных жидкостей, а также выявить особенности поведения таких рабочих сред в тех или иных температурных условиях.

Таким образом, тема диссертационной работы Галеевой Д.Р. является актуальной, поскольку разработка математических моделей, позволяющих проводить исследование гидродинамики одно- и двухфазных течений термовязких жидкостей в каналах, а также изучать особенности движения жидкой капли в потоке термовязкой жидкости, позволит в дальнейшем решать практические задачи, возникающие в различных технологических и медико-биологических процессах, где в качестве рабочего тела выступает жидкость, имеющая сложную зависимость вязкости от температуры, и на течение которой существенным образом влияет теплообмен на стенках канала.

ВХОД. № 3419-13
«16» 09. 2025г.

Научная новизна

В работе впервые были получены следующие результаты:

– реализовано моделирование ламинарного течения термовязкой жидкости с учётом монотонной и немонотонной (аномальной) зависимости вязкости от температуры в коническом диффузоре при наличии теплообмена на стенке;

– исследована зависимость объемного расхода и гидравлического сопротивления при течении термовязкой жидкости в диффузорах для различных параметров теплообмена и углов раскрытия диффузора. Показано, что расход термовязкой жидкости в диффузоре уменьшается с увеличением интенсивности теплообмена, а при углах раскрытия больше 10° расход жидкости мало зависит от теплообмена как для монотонно-вязкой, так и аномально-вязкой жидкости;

– разработана численная схема для решения уравнения Кана–Хилларда на основе метода контрольного объема путем его линеаризации;

– реализована математическая модель динамики капли в плоском канале, движущейся в жидкости с аномальной зависимостью вязкости от температуры, методом фазового поля;

– изучена скорость и степень деформации капли при изменении различных параметров без и с учетом температурного воздействия на жидкую каплю и несущую жидкость. При отсутствии температурного поля получено, что при малом капиллярном числе независимо от перепада давления капля стремится сохранить круглую форму, а при увеличении данного числа – сильно деформируется, вплоть до разрушения. При учете температурного воздействия показано, что образующийся вязкой барьер приводит к ускорению капли, причем, чем более он выражен, тем выше относительная скорость капли на выходе из канала; установлено, что холодная капля в горячей жидкости образует вокруг себя дополнительный вязкий барьер, а при низкой теплопроводности она способна разрушить высоковязкую область за счет изменения температуры несущей жидкости.

Для получения данных результатов были разработаны программные коды для расчета течения термовязкой жидкости в коническом диффузоре и скорости капли в плоском канале методом фазового поля.

Новизна полученных в диссертационной работе результатов не вызывает сомнений.

Научная и практическая значимость основных результатов

Научная и теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что полученные результаты влияния «вязкого барьера» на скорость жидкости в диффузорах разной геометрии, а также на скорость капли в потоке, дополняют и расширяют теоретические представления об особенностях динамики многофазных сред при воздействии температуры в каналах разной геометрии. Полученные выводы позволяют дать рекомендации по разработке технических устройств, включающих конические диффузоры и трубопроводы, и по совершенствованию протекающих в них процессов, с целью оптимизации расхода жидкости и

стабилизации работы всей системы.

Обоснованность и достоверность полученных положений и выводов

Обоснованность и достоверность научных результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечиваются корректностью физической и математической постановок задач, применением при разработке математических моделей фундаментальных законов механики многофазных сред, а также хорошими результатами сопоставления полученных решений в частных случаях с известными аналитическими решениями и результатами экспериментов. Степень обоснованности положений и выводов в диссертационной работе Галеевой Д.Р. соответствует общепринятой в рамках научной специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 125 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который включает 135 наименований. Текст работы содержит 66 рисунков и 4 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, практическая значимость и степень достоверности результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту, апробация работы, публикации соискателя по теме диссертации и кратко изложено содержание работы по главам.

В **первой главе** представлен обзор теоретических и экспериментальных исследований в области динамики гетерогенных сред с температурной зависимостью вязкости, а также литературный обзор работ, посвященных методу фазового поля.

Во **второй главе** приведена постановка задачи и математическая модель течения термовязкой жидкости в коническом диффузоре при наличии теплообмена с окружающей средой в цилиндрической системе координат; численная схема решения задачи методом контрольного объема с применением алгоритма SIMPLE, модифицированного для учета переменного коэффициента вязкости; проведена валидация компьютерного кода для классической задачи течения жидкости в круговом цилиндре без учета воздействия температуры. Рассмотрены монотонная и немонотонная (аномальная) зависимости вязкости от температуры; проведено сравнение полученных распределений температуры, вязкости и скорости жидкости для данных видов вязкости. Исследовано влияние теплообмена на стенках диффузора и геометрии диффузора на распределение параметров.

В **третьей главе** моделирование динамики смеси двух несжимаемых несмешивающихся жидкостей проводится с помощью уравнения Кана–Хилларда, описывающего разделение фаз в двухфазной системе, в двумерной постановке. Подробно расписана новая численная схема решения данного уравнения с учетом линеаризации на основе метода контрольного объема. Проведена верификация алгоритма путем сравнения численных результатов с одномерным точным решением, а также проведения тестов сеточной

сходимости и сходимости для временной дискретизации. Исследовано влияние начальных и граничных условий на эволюцию разделения фаз.

Четвертая глава посвящена решению задачи деформации одиночной капли, движущейся в потоке несжимаемой жидкости с аномальной зависимостью вязкости от температуры в плоском канале. Представлена математическая модель данной задачи с применением метода фазового поля и численная схема для её решения. Рассмотрены два случая – без учета температурного поля и с учетом влияния температурного поля на вязкость жидкости. Проведена валидация и верификация полученного решения путем сравнения численных расчетов с экспериментальными данными. В случае отсутствия температурного поля исследовано влияние капиллярного числа на скорость и форму капли; проведено сравнение результатов численного моделирования с аналитической формулой скорости капли. При рассмотрении динамики капли с учетом температурного воздействия, когда несущая жидкость обладает аномальной зависимостью вязкости от температуры и в канале образуется «вязкой барьер», проведено исследование влияния данного барьера на скорость капли, а также влияние начальной температуры самой капли на форму и положение вязкого барьера в канале.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

Замечания по диссертационной работе

1) При сопоставлении результатов численных расчетов с аналитическими решениями, представленными на стр. 39 (рис. 2.4), стр. 67 (рис. 3.2) и стр. 94-95 (рис. 4.10), выводы об их хорошем согласовании делаются только на основании визуализации результатов в виде графиков. Следует данные выводы подтвердить также количественными оценками, например, расчет относительных/абсолютных погрешностей или сравнение максимальных погрешностей, определенных на рассматриваемом диапазоне.

2) На рисунках 2.7, 2.10 и на большинстве рисунков четвертой главы присутствует безразмерная величина time , которая в тексте нигде не описана и не понятно каким образом проводить сопоставление ее значения с реальными моментами времени.

3) На стр. 48 (строки 2-4 сверху) утверждается, что "При этом скорость жидкости при $Nu \geq 28.4$ практически не меняется, это говорит о том, что достигнуто критическое значение скорости", однако, не представлено никаких количественных оценок того, что именно при значении $Nu = 28.4$ достигается критическое значение скорости.

4) Нет пояснения, с чем связан выбор узкого диапазона углов раскрытия диффузора – в пределах от 6° до 10° (стр. 51). Хотелось бы понять, обусловлен ли данный выбор геометрии диффузора ограничением математической модели, численной схемы или другими соображениями.

5) В тексте п. 3.2.1 отсутствует корректное определение переменной n – на стр. 62 (1-2 строки сверху) написано "...в момент времени n ...", далее по тексту n упоминается как "временной слой".

