

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ковалёва Александра Владиславовича «Влияние вязкости фаз на гидродинамические характеристики потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

На данный момент широко известно, что использование микроканальных устройств приводит к интенсификации переноса вещества и энергии, делая микроканалы весьма востребованными для химической промышленности и технологий, связанных с теплоотводом. В микроканальных потоках жидкость-жидкость, в которых преобладают эффекты вязкого трения и межфазного натяжения, важнейшую роль играют вязкости фаз и геометрические характеристики микроканалов. В настоящее время малоизученным является влияние вязкостей жидкостей, протекающих в микроканалах, на гидродинамику течения жидкость-жидкость. Кроме того, в литературе мало затронуты эффекты геометрических параметров микроканалов, например, наличие дугообразных участков микроканала с высокой кривизной. Диссертационная работа А.В. Ковалёва направлена на изучение гидродинамических характеристик и структуры течений двух несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения для широкого диапазона отношений вязкости фаз и параметров потока. За счет проведения такого рода исследований можно прогнозировать переходы между режимами течения, в частности переход от сегментированного потока к непрерывному, новые знания в рамках которого являются весьма востребованными при проектировании микрочипов для проведения химических реакций в микроканалах, например, реакции экстракции. Также результаты исследований могут способствовать подбору наиболее эффективного дизайна микромиксеров и микрореакторов. В связи с этим

тематика диссертационных исследований Ковалёва Александра Владиславовича является, безусловно, актуальной.

Тема диссертации А.В. Ковалёва соответствует приоритетному направлению развития науки в Российской Федерации (Указ Президента России от 07.07.2011 № 899): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критической технологии федерального уровня, получившей высокий рейтинг по перспективам развития: «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

Диссертация А.В. Ковалёва **состоит из введения, пяти глав и заключения.** Можно выделить качественную и логичную структуру рукописи диссертации, в которой хорошо прослеживается связь между подразделами обзорной главы и результатами исследований в последующих главах, и уместное использование разделов и подразделов в каждой главе. Считаю важным выделить прекрасную подготовку практически всего графического материала рукописи диссертации. Прочитировано 113 работ, большая часть из которых опубликованы в профильных международных журналах.

Во введении обоснована актуальность тематики исследований, сформулированы цель и задачи исследований, защищаемые положения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность результатов, личное участие автора.

В первой главе диссертации приведены результаты анализа научной литературы по тематике исследований. Выполнено разделение направлений исследований в области двухфазных потоков на микромасштабах с выделением тематики изучения режимов течения и факторов, влияющих на их реализацию. Сформулированы еще нерешенные научным сообществом задачи.

Во второй главе диссертации представлено описание материалов, экспериментального стенда, методов исследований, погрешностей регистрации основных определяемых характеристик.

В третьей главе приведены результаты визуализации течений и сравнительный анализ карт режимов течений, а также предложен модифицированный безразмерный комплекс, позволяющий получить совпадение границ перехода между непрерывным и сегментированным потоками с высокой точностью.

В четвертой главе диссертации представлены результаты экспериментального исследования влияния вязкостей фаз на снарядный режим течения и его свойства. Получен ряд эмпирических выражений для оценки частоты формирования снарядов и капель в рассматриваемых микроканалах.

В пятой главе изучены особенности и характеристики потоков жидкость-жидкость при малых отношениях вязкости дисперсной фазы к несущей в прямых и серпантинных микроканалах.

В заключении сформулированы основные выводы по результатам исследований.

Практическая направленность диссертации А.В. Ковалёва заключается в том, что полученная экспериментальная база позволяет проектировать чипы для проведения химических реакций в микроканалах в непрерывном и сегментированном режимах, создавать микро- и наночастицы в каналах с характерными размерами до нескольких сотен микрометров, подбирать наиболее эффективный дизайн микромиксеров и микрореакторов, а также проводить верификации численного моделирования и аналитических моделей.

Научная новизна диссертации заключается в получении уникальных результатов исследования структуры потока и режимов течения с использованием современных оптических методов измерения Particle Image Velocimetry / Particle Tracking Velocimetry (micro-PIV/PTV) и скоростной

визуализации для различных систем жидкость-жидкость в микроканалах для широкого диапазона вязкостей фаз и скоростей потока. Предложена модификация безразмерного комплекса на основе чисел Вебера и Онезорге, обобщившая границу перехода между сегментированными и непрерывными режимами для жидкостей с различными физическими свойствами. Впервые установлено влияние отношения вязкостей фаз на форму капель и снарядов и соответствующие изменения в топологии внутренних течений с описанием механизма явления.

Сформулированные научные положения диссертационных исследований **обоснованы**. В тексте автореферата и диссертации приведены результаты, иллюстрирующие правомерность сделанных автором заключений.

Достоверность полученных автором диссертации результатов **основана** на достаточном анализе неопределенности измерений ключевых параметров и характеристик, сравнении с известными данными других авторов, а также хорошей воспроизводимости результатов исследования. Кроме того, представленные результаты прошли рецензирование профильными специалистами и опубликованы в ведущих мировых изданиях.

Личный вклад автора сформулирован в рукописи и автореферате с указанием разных видов работ.

Анализ содержания рукописи и автореферата диссертации дает основание для формулирования нескольких **замечаний и рекомендаций**:

1. В формулировке научной новизны диссертационного исследования не упоминается использование метода лазерно-индуцированной флюоресценции (LIF). Целесообразно было обратить на это внимание и использовать как усиливающий фактор. Кроме того, при описании метода LIF в главе 2 дается очень мало конкретной информации, например, о концентрации красителя, причинах выбора концентрации красителя, частоте съемки камеры. Особенно это заметно при сравнении с подробным описанием методов micro-PIV / PTV.

2. В диссертации на стр. 62 есть фраза «...в капельном режиме λ начинает влиять на длину снарядов...». В диссертации капельный и снарядный режимы рассматриваются как отдельные. В данном случае речь идет про размеры капель или все-таки про снарядный режим и длину снарядов?
3. Введение символов параметров и характеристик в Оглавление выглядит достаточно противоречиво. Целесообразнее было использовать текст, поскольку расшифровка символов дается только где-то в глубине диссертации.
4. Основные положения, выносимые на защиту, сформулированы в общем виде в формате перечисления типа полученных результатов. Это отнимает уникальность именно этой диссертации. Целесообразно было привести конкретную числовую информацию для характеристики условий (например, $\lambda < 1$), порогов, диапазонов, подчеркивая новизну исследований.
5. В рукописи диссертации на стр. 12 вводятся безразмерные параметры λ , q , ϵ_i , N . Однако, не приводятся ссылки на источники литературы, в которых они были эффективно использованы или впервые введены. Кроме того, остается без внимания разъяснение того, почему указанные параметры важны именно для систем жидкость-жидкость в микроканалах.
6. При обсуждении материалов, из которых изготовлены микроканалы на стр. 40, к сожалению, упускаются из внимания характеристики этих материалов. Более того, в диссертационном исследовании, посвященном в первую очередь установлению влияния вязкости жидкостей на гидродинамические характеристики, приводится мало детальной информации об измерениях вязкости (равно как и поверхностного натяжения). В частности, целесообразно было обсудить примененные аналитические измерительные приборы, их точность, дискретность, условия измерения свойств: скорость сдвига при измерениях для ньютоновских жидкостей, количество измерений при идентичных условиях, а также другие значимые для целевых измерений особенности.

7. В рукописи диссертации на рисунке 3.3.3. и в его подписи отсутствуют пояснения, касающиеся черной сплошной кривой. В тексте рукописи также отсутствует ссылка на этот рисунок. По этим причинам было довольно сложно разобраться с тезисами обсуждения, приведенного над рисунком 3.3.3. Также в тексте рукописи в районе рисунков 3.3.2. и 3.3.3. приведены ссылки на источники, которые, скорее всего, цитируются в легендах этих рисунков. Однако, формат представления ссылок в легендах не позволяет сделать сопоставление с информацией в тексте. Целесообразно было сделать нумерацию ссылок и в легендах рисунков. Это замечание относится и к ряду других рисунков в диссертации.

8. В подразделе 4.1. диссертации не указаны диапазоны основных параметров (как минимум, чисел капиллярности), в которых может быть определена частота формирования капель с использованием предложенных моделей. Целесообразно было привести эти диапазоны для понимания применимости предложенных моделей. Кроме того, возникает закономерный вопрос о проведении проверки надежности прогнозирования моделей, предложенных в этом подразделе, с использованием данных из других научных работ. Желательно было привести пояснения и обоснования со ссылками на работы коллег.

Сделанные замечания не снижают высокой положительной оценки диссертационной работы А.В. Ковалёва.

Тема диссертации А.В. Ковалёва «Влияние вязкости фаз на гидродинамические характеристики потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения» соответствует паспорту специальности «1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы» (по части направления исследований: «Микро-и наногидродинамика»).

Содержание автореферата соответствует содержанию рукописи диссертации.

Результаты диссертационного исследования А.В. Ковалёва хорошо апробированы на научных международных и всероссийских

конференциях различного уровня и публиковались в журналах, рекомендованных ВАК Минобразования РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций (Chemical Engineering Journal, Chemical Engineering Research and Design, Chemical Engineering & Technology Теплофизика и Аэромеханика и др.).

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации А.В. Ковалёва можно заключить, что диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями на 26.09.2022), так как является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, в данном случае механики жидкости в направлении исследований – микрогидродинамика.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что А.В. Ковалёв заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, канд. физ.-мат. наук
(01.04.14, физико-математические науки),
доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Национального исследовательского
Томского политехнического университета
Пискунов Максим Владимирович
т. +7(3822) 701-777, вн. 3465, piskunovmv@tpu.ru

Подпись М.В. Пискунова заверяю
Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета
Кулинич Екатерина Александровна



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, т. +7(3822) 60-63-33.

13.01.2023