

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе
Ковалева Александра Владиславовича **«Влияние вязкости фаз на
гидродинамические характеристики потоков несмешивающихся
жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения»**,
представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа А.В. Ковалева посвящена экспериментальному исследованию поведения потока двухфазной жидкости в канале с характерным размером в сотни микрон. Микрожидкостные устройства получили мощный импульс к развитию на рубеже 90-х гг XX века и 00-х гг XXI века, прежде всего, с появлением важных приложений в микробиологии. Именно в это время появляется технология флуоресцентных генетических маркеров (GFP), которая произвела революцию в технике биологического эксперимента. GFP впервые позволило визуализировать динамику белковых полей в клетках и микроорганизмах. Для наблюдения за этими процессами *in vivo* требовалось создание гидродинамических устройств (микробы живут в воде), которые были бы

- (а) достаточно малыми (от 100 до 500 мкм) – чуть больше или сравнимыми с размером клеток и бактерий (5-20 мкм);
- (б) прозрачными для организации наблюдения за белковой флуоресценцией в оптическом диапазоне;
- (в) проточными для беспрепятственного снабжения клеток и бактерий питательными веществами и вывода отходов их жизнедеятельности.

Появившийся раздел гидромеханики получил наименование «микрофлюидика», подчеркивая таким образом характерный размер используемых каналов и формируемых в них течений. За двадцать лет бурного развития от микрофлюидики ответвились новые направления, характерные масштабы гидродинамических явлений в которых определяются рассматриваемыми приложениями. Например, химические технологии тонкого синтеза на рубеже 00-х и 10-х годов XXI века претерпели свою революцию, которая привела к созданию микрореакторов проточного типа в интересах фармацевтического производства. Характерный размер канала микрореакторов находится в диапазоне от 500 мкм до 5 мм, что слегка перекрывается снизу с диапазоном микрофлюидики. С другой стороны, развитие нанотехнологий привело к появлению нанофлюидики, работающей в диапазоне от 1 до 1000 нм (от 0.001 до 1 мкм). Типичной областью применения таких устройств является молекулярная сборка, разделение биомолекул, мембранные технологии. Данная диссертация посвящена изучению микрожидкостных устройств с проточной двухфазной средой жидкость-жидкость, которые активно используются при производстве лекарств в форме микрокапсул, создании микроэмульсий с контролируемой дисперсией капель, проведении статистических экспериментов в микробиологии в однотипных

капельных ансамблях, создании устройств цифровой микрофлюидики. Все указанные направления продолжают бурно развиваться, находя многочисленные приложения в генетике, биомедицине, микроробототехнике, биотехнологиях, проточном химическом синтезе и др. Всё сказанное определяет высокую **актуальность** рассматриваемого диссертационного исследования.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух списков цитированной литературы: один (публикации автора диссертации) содержит 23 наименования, другой (все остальные ссылки) включает 113 наименований. Общий объём диссертации составляет 98 страниц, включая 56 рисунков и 6 таблиц.

Во **введении** обозначены цель и задачи исследования, ее новизна, научная и практическая значимость, обоснована актуальность работы, представлены положения, выносимые на защиту. В **первой главе** приведён подробный детализированный обзор современного состояния исследуемой области. Дано описание основных уравнений и граничных условий, описывающих задачу о течении двух несмешивающихся жидкостей в общем случае. Рассмотрены безразмерные критерии подобия, возникающие из соответствующих уравнений сплошной среды. **Вторая глава** содержит описание экспериментальной установки, методов исследования, рабочих участков и жидкостей, использованных в экспериментах. **Третья глава** посвящена результатам исследования влияния отношения вязкостей фаз на режимы течения несмешивающихся жидкостей в прямых микроканалах Т-типа. В рамках **четвертой главы** автор фокусирует внимание на конкретном режиме течения двухфазной среды жидкость-жидкость через Т-образный микроканал. Представлены результаты систематического исследования влияния отношения вязкостей фаз на снарядный режим и его свойства, так как он является наиболее важным для использования в приложениях. **Пятая глава** детально описывает гидродинамику потоков жидкость-жидкость при малых значениях отношений вязкостей фаз в прямых и серпантинных микроканалах, где был обнаружен фазовый переход к новому режиму течения. В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы, приведены рекомендации и обсуждаются перспективы дальнейшего исследования течения двухфазной среды жидкость-жидкость через микрожидкостный канал.

Необходимо отметить, что **большинство результатов** диссертационной работы **получено впервые**. Перечислим наиболее сильные (по мнению оппонента) результаты работы: (а) автору удалось найти комбинации безразмерных параметров задачи, которые определяют критерий подобия для случая перехода исследуемой системы из сегментированного режима течения в режим, характеризующийся непрерывным потоком для разнообразных сочетаний рабочих жидкостей; (б) вывод универсальной зависимости частоты формирования капель от числа капиллярности задачи; (в) был обнаружен новый режим течения, который реализуется при малых значениях отношения вязкостей жидких фаз и характеризуется формированием сопутствующего облака капель микронного и

субмикронного размера в снарядном режиме течения. Так как используемая автором архитектура микрожидкостного канала (микроканал Т-типа) часто используется во всевозможных приложениях и фундаментальных исследованиях, в которых, как правило, требуется заранее знать в каком режиме будет работать устройство при данных размерах и рабочих жидкостях, то полученные в диссертации данные о бифуркационных переходах в канале и обобщения с помощью безразмерных критериев подобия несомненно будут полезны для других исследователей. Это определяет **практическую значимость** работы.

Отличное впечатление оставляет список публикаций соискателя. Основные результаты диссертации опубликованы в профессиональном международном журнале по химическим технологиям Chemical Engineering Journal (Q1), который имеет один из самых высоких импакт-факторов среди журналов в этой области. Еще два журнала Chemical Engineering and Technology, Chemical Engineering Research and Design также относятся к высоко рейтинговым. Обычно процесс рецензирования в этих изданиях представляет собой серьезную дискуссию с ведущими специалистами в данной области. Это также подчеркивает **научную новизну** полученных результатов. Сильное впечатление на оппонента произвела тщательно продуманная и виртуозно изготовленная сложная экспериментальная установка. Микрожидкостные устройства, в которых экспериментатору трудно что-то поправить руками, требуют от исследователя особенного педантизма, терпения, внимательного отношения к деталям в процессе их изготовления. По капризности и чувствительности входящих в неё независимых подсистем и большому количеству элементов оборудования, работу которых необходимо было согласовать, по используемым тонким методикам наблюдения за потоком (например, микро-PIV), изготовленная диссертантом экспериментальная установка является одной из самых сложных, которые видел оппонент в нашей стране в этой области исследований.

Диссертационная работа А.В. Ковалева не лишена недостатков и неясностей, в некоторых местах рождает желание подискутировать. Перед тем как перейти к существенным вопросам, следует отметить, что, в целом, диссертация написана правильным русским языком. Количество ошибок не превышает стандартную статистическую погрешность. Тем не менее, в тексте встречаются опечатки, неудачные выражения, жаргонизмы. Например:

«...при экстремально низких отношениях вязкостей фаз» (стр. 7)

«При низких значениях отношения вязкостей... » (стр. 59)

«При низких q и Ca_{bulk} ...» (стр. 71)

«...в случае снарядного режима при низких отношениях» (стр. 74)

«...при более низких значениях q » (стр. 81) и т.д.

Хорошо видно, что использование выражения *низкое значение* является устойчивой привычкой для автора. Это выражение иногда применяют к равномерной шкале, например, температуры. Но в данном контексте правильнее писать: *при малых значениях отношения вязкостей фаз*, так как речь везде идет о значениях параметров вблизи нуля.

Перейдем к более существенным замечаниям к работе, которые требуют пояснений автора:

1. С точки зрения оппонента, структура диссертации не самая оптимальная. Из 98 страниц – 39 занимают введение и литературный обзор. С учетом списка литературы (11 страниц) описание полученных результатов занимает столько же места, сколько литературный обзор. Таким образом, некоторые важные детали исследования остались за кадром (см. ниже). Наблюдается явный перекос в сторону обзора.
2. В продолжение темы структуры диссертации отметим, что литературный обзор состоит из двух частей. Первая часть содержит перечень ссылок на работы автора, а второй – на все остальные работы. С таким оформлением оппонент встречается впервые. Сами списки имеют отдельную нумерацию и оба начинаются с 1. Таким образом, когда в тексте автор ссылается на какой-то источник, совершенно непонятно какой список имеется в виду. Сам литобзор по теме диссертации выполнен блестяще (он очень подробный и основательный), однако, диссертант обсуждает работы, которые имеют отношение лишь к узко понимаемой постановке задачи. Например, диссертант подробно обсуждает течения в несмешивающихся системах, но практически ничего не пишет о смешивающихся системах. Также автор начисто игнорирует вопросы приложений исследуемых явлений, упоминая их в одном месте лишь вскользь. Поэтому обзор не дает общей картины проводимых исследований в микрофлюидике и не указывает место данного исследования в общем ряду других работ.
3. В работе недостаточно приведено информации о методах изготовления микроканалов. Всего упоминается четыре методики. В каждом случае одной фразой обозначен метод получения микрожидкостного канала и материал, но важная сопутствующая информация отсутствует. Изготовлены ли микроканалы лично диссертантом или этот заказ был передан какой-то компании на основе аутсорсинга? Если компании, то какой? Если лично, то на каком оборудовании в каждом из четырех случаев? Каким образом производилась зачистка канала от пыли, крошек и отходов после изготовления микрорельефа? Из какого материала была изготовлена крышка и каким образом она присоединялась к изготовленному микрорельефу? Насколько свойства материала крышки отличаются от самого массива, в котором изготовлен микрорельеф?
4. Автор с самого начала использует терминологию для обозначения режимов течений двухфазной жидкости через микроканал Т-типа, но ни словом не объясняет почему используется именно такая терминология. Если «параллельный режим течения» еще можно как-то принять без объяснений (похоже, что жидкости в фазах текут в канале ламинарным образом), то термин «кольцевой режим течения», применяемый для волнообразной межфазной границы, вызывает недоумение. Возможно это жаргонизм, к

которому привык автор. Следует объяснить происхождение каждого термина и чем каждое название обосновывается.

5. Как именно формировались пары изображений, к которым применялся алгоритм PTV/PIV? Если это были реально последовательные кадры, то каким именно был промежуток между кадрами? В диссертации указано, что промежуток был «короткий», но какой именно? Из каких соображений выбиралось это значение и изменялось ли оно в зависимости от скорости потока /пары жидкостей?
6. В главе 5 обсуждается новый интересный режим течения двухфазной жидкости, при котором наблюдается непрерывный отрыв капель микронного размера от снарядных капель дисперсной фазы. Автор отмечает, что подобный эффект наблюдается в случае наличия в среде растворенного поверхностно-активного вещества (ПАВ). В данной работе ПАВ не были использованы, но эффект наблюдался. В связи с этим хочется более подробной информации о контроле диссертанта за наличием ПАВ в воде. Вода, как известно, является уникальным пылесосом ПАВ и всегда содержит примеси (грязь), имеющие поверхностную активность. Требуется специальная очистка воды перед каждым экспериментом, чтобы исключить это потенциальное влияние. Выполнял эти процедуры диссертант? Так как метод сборки микрожидкостного канала в диссертации подробно не описан, использование разнообразной органики для изготовления и очистки каналов неизбежно, то сомнения насчет источника паразитной ПАВ у оппонента остаются.

Указанные замечания, в целом, носят характер уточнений/ пожеланий и не влияют на общую положительную оценку данной работы, выполненной на высоком мировом научном уровне и оставившей у оппонента позитивное мнение.

Общее заключение по работе.

Диссертация Ковалева Александра Владиславовича представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Положения, вынесенные на защиту, достоверны и хорошо обоснованы апробацией применяемых методик и достоверностью полученных диссертантом результатов и не вызывают возражений.

Оформление и структура автореферата дает ясное представление о целях, методах, результатах и перспективах исследования.

Работа выполнена диссертантом самостоятельно на высоком научном уровне.

Полученные результаты являются новыми, актуальными и имеют высокую научную и практическую значимость.

Результаты диссертационной работы в полной мере представлены в открытой печати в виде статей в журналах из перечня ВАК (как российских, так и зарубежных) и обсуждены на всероссийских и международных конференциях.

Принимая во внимание всё выше сказанное, считаю, что диссертационная работа «Влияние вязкости фаз на гидродинамические характеристики потоков несмешивающихся жидкостей в микроканалах прямоугольного сечения» удовлетворяет всем требованиям пункта 9 «Положения о присвоении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (с изменениями согласно постановлению Правительства РФ от 21.04.2016 №335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Ковалев Александр Владиславович, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой прикладной физики ФГАОУ ВО «Пермский
национальный исследовательский политехнический университет», доцент,
доктор физико-математических наук по специальности
1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Брацун Дмитрий Анатольевич

/Д.А. Брацун

Подпись Д.А. Брацун заверяю:

Ученый секретарь

Ученого совета ПНИПУ

/ В. И. Макаревич

« 13 » января 2020 г.

