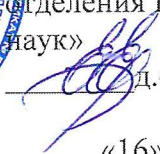


«УТВЕРЖДАЮ»



Директор федерального
государственного бюджетного
учреждения науки «Институт
гидродинамики имени
М.А. Лаврентьева Сибирского
отделения Российской академии
наук»


д.ф.-м.н. Е.В. Ерманюк

«16» _____ января 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт гидродинамики имени М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской академии наук»
о диссертационной работе Ковалева Александра Владиславовича «Влияние вязкости фаз
на гидродинамические характеристики потоков несмешивающейся жидкости в
микроканалах прямоугольного сечения»

В диссертации А. В. Ковалева представлено комплексное экспериментальное исследование гидродинамических характеристик и структуры течений двух несмешивающихся жидкостей в прямых и серпантинных микроканалах прямоугольного сечения для широкого диапазона отношений вязкости фаз и параметров потока.

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность экспериментального исследования потоков жидкость-жидкость в микроканалах различной геометрии обусловлена как фундаментальными вопросами микрогидродинамики, так и широким спектром применения микроканальных устройств в различных приложениях. Микроканалы широко применяются в устройствах для секвенирования биополимеров, генерации эмульсий, производства микрочастиц, охлаждения процессоров и т.д. Существенное увеличение отношения площади поверхности к заключённому в ней объёму (по сравнению с крупномасштабными устройствами) приводит к увеличению значений коэффициентов переноса вещества и энергии, что делает микроканалы перспективной альтернативой для химической промышленности и теплоотвода. Особенностью многофазных, в частности - двухфазных потоков жидкость-жидкость, является наличие развитых межфазных поверхностей, которые вносят дополнительную сложность в аналитические и численные подходы решения задач гидродинамики. Это ведёт к необходимости экспериментальных исследований, как фундаментального, так и прикладного характера, которые позволяют

получить данные о режимах течения и ключевых управляющих соотношениях, необходимые для построения эмпирических моделей и моделирования происходящих физических явлений. Таким образом, тематика диссертации А. В. Ковалева является актуальной, а изложенные в диссертации результаты несомненно важны как в фундаментальном, так и в прикладном отношении.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, включающих в себя обзор литературы; заключения и библиографии. Работа изложена на 98 страницах, содержит 56 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 113 наименования работ.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, определяются её цель и задачи, представлены выносимые на защиту положения, описана научная новизна и личный вклад автора.

В **первой главе** автор приводит обзор современного состояния исследуемой области. В разделе 1.1 кратко дано описание основных уравнений и граничных условий, описывающих задачу о течении двух несмешивающихся жидкостей в общем случае. Рассмотрены безразмерные критерии подобия, следующие из структуры соответствующих уравнений сплошной среды. В разделе 1.2 подробно рассмотрены режимы течения, возникающие в микроканальных потоках систем типа «жидкость-жидкость» и «газ-жидкость». Проанализирован ряд наиболее актуальных работ, в которых исследовались режимы течения жидкость-жидкость в микроканалах и были построены карты режимов с использованием безразмерных параметров. Показано, что на сегодняшний день не существует универсального критерия, позволяющего предсказать переход между непрерывным и сегментированным потоком для произвольной системы жидкость-жидкость. В разделе 1.3 подробно обсуждаются сегментированные режимы течения (снарядный, капельный), их свойства и особенности. В разделе 1.4 рассмотрено влияние отношения вязкостей на карты режимов и структуру течений в сегментированных режимах. Показано, что отношение вязкостей дисперсной и несущей фаз является критическим параметром для карт режимов и структуры течений в дисперсной фазе. Обзор даёт представление о состоянии и основных трендах экспериментальных исследований в области микрогидродинамики, и понимание места работы автора в мировой науке в данной предметной области.

Вторая глава содержит описание экспериментальной установки, методов исследования, рабочих участков и жидкостей, использованных в экспериментах. Описаны способы изготовления микроканалов и их геометрия. Приведён список рабочих жидкостей и их свойств, указаны методы измерения, с помощью которых были получены значения

физических свойств жидкостей. Описаны методы скоростной визуализации, а также метод визуализации структуры потока за счёт флуоресцентного красителя – LIF (Laser Induced Fluorescence). Проведено сравнение измерений методами micro-PIV и micro-PTV для случая микроканальных потоков жидкость-жидкость, сопоставлена глубина измерения, а также разрешение и качество получаемых на выходе векторных полей, что является весьма важным с методической точки зрения.

Третья глава посвящена результатам исследования влияния отношения вязкостей фаз на режимы течения несмешивающихся жидкостей в прямых микроканалах с Т-входом. Системы жидкость-жидкость выбирались таким образом, чтобы исключить либо свести к минимуму влияние таких сторонних параметров, как смачиваемость стенок микроканала, плотность фаз и межфазное натяжение. В результате проведённых экспериментов были визуализированы режимы течения для всех исследуемых наборов жидкостей в широких диапазонах объёмных расходов несущей и дисперсной фаз. Построены соответствующие карты режимов. Использование полученной обширной базы экспериментальных данных позволило подобрать свободные параметры при степенных зависимостях в ранее предложенном безразмерном комплексе $We^{\alpha}Oh^{\beta}$ (We – число Вебера, Oh – число Онезорге). Показано, что при выборе значений для α и β равными 0,4 и 0,6, соответственно, экспериментальные данные, полученные для отношения вязкостей фаз $\lambda < 1$, ложатся на одну кривую с хорошей точностью. Проведено сравнение с литературными данными для случаев $\lambda < 1$ и $\lambda > 1$. Несмотря на различие экспериментальных установок, геометрии сечений и входов микроканалов, а также возможные погрешности в определении границ перехода, критерий $We^{0,4}Oh^{0,6}$ показал удовлетворительный результат. Сформулированы границы применимости полученного критерия.

Четвёртая глава представляет собой результаты систематического исследования влияния отношения вязкостей фаз на снарядный режим и его свойства. В рамках диссертации была визуализирована форма поверхности снарядов для различных значений λ . При низких значениях отношения вязкостей $\lambda \sim 0,001$ были обнаружены существенные деформации межфазной границы. Деформации снарядов наблюдались, начиная с $\lambda = 0,0067$ и ниже. По результатам визуализации снарядного режима течения были рассчитаны скорости движения снарядов и построены их зависимости от среднерасходной скорости потока. Показано, что скорость снарядов определяется толщиной плёнки несущей фазы, которая в свою очередь зависит только от числа капиллярности, и не зависит от вязкости дисперсной фазы. Экспериментально подтверждён переход от выдавливающего режима сегментированного потока к капельному при достижении критических значений числа капиллярности. Предложена формула для оценки частоты формирования снарядов и капель

при малых скоростях потока. При больших скоростях получена универсальная зависимость частоты формирования от управляющих параметров в вязко-капиллярном режиме для Т-образного микроканала. Показано влияние отношения вязкостей фаз на движение и распад тороидальных вихрей в снарядах дисперсной фазы.

Пятая глава детально описывает гидродинамику потоков жидкость-жидкость при малых отношениях вязкостей ($\lambda \sim 10^{-3}$) в прямых и серпантинных микроканалах. Описана деформация межфазной границы в случае малых отношений вязкостей фаз, предложен безразмерный параметр, определяющий механизм явления. Показано, что предложенный параметр определяет также и структуру потока в снарядах дисперсной фазы, выделено три характерных вида топологии течения. Автором обнаружено интересное явление срыва микрокапель с задней кромки снарядов для случая малых отношений вязкостей за счёт сдвиговых напряжений по механизму «tip-streaming», построены карты режимов, в которых переход к снарядному режиму с отрывом микрокапель имеет универсальный вид для разных наборов жидкостей. Исследовано влияние кривизны серпантинных каналов на режимы течения потоков жидкость-жидкость с малыми значениями отношения вязкостей. Показано, что искривленные участки не влияют на переход между параллельным и сегментированным течением, однако приводят к деформации снарядов, что может вызвать срыв лигаментов с их хвостовой части при достижении критического значения параметра qCa_{bulk} , где q – отношение расходов, а Ca_{bulk} – число капиллярности. Автором установлено, что увеличение кривизны изогнутых участков микроканала может индуцировать дополнительные области циркуляции, как в дисперсной, так и в несущей фазах, а также интенсифицировать перенос вещества через центральную линию канала.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации А. В. Ковалева.

Автором диссертации получены следующие **новые результаты**:

На основе обширной базы данных по границам перехода между различными режимами течения для ряда комбинаций несмешивающихся жидкостей предложена модификация безразмерного комплекса на основе чисел Вебера и Онезорге, которая позволила обобщить границу перехода между сегментированными и непрерывными режимами на случай жидкостей с различными физическими свойствами, определены пределы применимости обобщения по отношению вязкостей жидкостей и диаметру каналов.

Впервые показано влияние отношения вязкостей фаз на форму капель и снарядов и соответствующие изменения в топологии внутренних течений, описан механизм явления.

Показана возможность срыва микрокапель с хвостовой части снарядов дисперсной фазы для случая малых отношений вязкостей фаз за счёт сдвиговых напряжений при отсутствии поверхностно-активных веществ, предложен безразмерный комплекс для определения перехода к отрыву микрокапель.

В потоках жидкостей с малым отношением вязкости дисперсной фазы к несущей в серпантинных микроканалах впервые обнаружены разрыв снарядов дисперсной фазы в криволинейных участках за счёт деформации межфазной границы и разрушение вихревых структур в перемычках несущей фазы при малых числах Дина.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Предложенная в работе модификация безразмерного комплекса позволяет предсказать переход от сегментированного потока к непрерывному в широких диапазонах физических свойств жидкостей при различных вариациях геометрии микроканалов. В совокупности с данными по длине и скорости снарядов текущая экспериментальная база позволяет проектировать чипы для проведения химических реакций в микроканалах, как в непрерывном, так и в сегментированном режиме. Обнаруженные режимы с генерацией капель микронного и субмикронного размера могут быть использованы для создания микрочастиц в каналах с характерными размерами до нескольких сотен микрометров. Данные по интенсификации перемешивания и циркуляции в вихревых структурах в серпантинных и прямых микроканалах позволяют подбирать наиболее эффективный дизайн устройства для создания микромиксеров и микрореакторов. Детальные экспериментальные данные о распределениях скорости в дисперсной фазе могут быть использованы для верификации численного моделирования и аналитических моделей

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных апробированных измерительных методов. В работе представлен анализ погрешностей эксперимента, а основные результаты получены на основе больших статистических выборок. Повторяемость экспериментов была протестирована и подтверждена, как в рамках данной диссертации, так и в работах других авторов, цитирующих опубликованные по представленным результатам статьи. Сравнение с известными из литературы аналитическими и эмпирическими моделями, а также с экспериментальными данными других авторов дополнительно подтверждает достоверность представленных результатов.

Замечания по диссертационной работе

1. Работа хорошо написана и вычитана. Однако, имеется небольшое количество опечаток. Например, в ссылке №63 (стр. 27) неправильно указан инициал автора,

должно быть Cox R.G. Можно также отметить, что у данного автора есть обзор Cox R.G & Mason S.G. (1971) Suspended particles in fluid flow through tubes // Annu. Rev. Fluid Mech. V.3. P. 291-316, который имеет отношение к теме диссертации, в частности, параграф 8.

2. Динамика капель и «снарядов», ограниченных капиллярной границей раздела, может зависеть от загрязнения капиллярной поверхности поверхностно активными веществами, причем влияние может быть довольно существенным даже при малой концентрации загрязнений. В диссертации можно было упомянуть возможность этих эффектов, а также ряд посвященных этой проблеме работ, например, Cuenot B., Magnaudet J., Spennato B. The effects of slightly soluble surfactants on the flow around a spherical bubble // J. Fluid Mech. (1997), V. 339. P. 25–53. Paraparti R., Papageorgiou D., Maldarelli C. Theory and experiments on the stagnant cap regime in the motion of spherical surfactant-laden bubbles // J. Fluid Mech. (2006). V. 559. P. 1–44.

Заключение

Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу в области экспериментального исследования гидродинамических течений несмешивающихся жидкостей в микроканалах. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты исследований опубликованы в 23 работах, включая 9 статей, в том числе 8 статей – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых изданий и изданий, рекомендованных ВАК. Работа прошла апробацию на многочисленных конференциях российского и международного уровня и соответствует специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертационная работа «Влияние вязкости фаз на гидродинамические характеристики потоков несмешивающейся жидкости в микроканалах прямоугольного сечения» удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Ковалев Александр Владиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертационная работа обсуждалась на научном семинаре «Прикладная гидродинамика» федерального государственного бюджетного учреждения науки

16.01.2023