

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения  
науки Института теплофизики Уральского отделения РАН

к.ф.-м.н. А. В. Виноградов

11 февраля 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

**Роньшина Федора Валерьевича**

«Двухфазные течения в коротких прямоугольных микроканалах»,  
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.02.05 –

Механика жидкости, газа и плазмы

**Актуальность** темы диссертации Роньшина Ф.В., посвященной исследованию двухфазных течений в микроканалах, связана, в основном, с широким использованием полученных знаний в технических устройствах (микроэлектромеханические системы, микроразмерные теплообменники, микрофлюидика и др.). Двухфазные течения в микроканалах имеют огромный потенциал для решения проблемы охлаждения систем микроэлектроники. Особенно это актуально в связи с развитием трехмерных чипов. Выполненное исследование является значительным вкладом в развитие методической составляющей экспериментальных исследований. Важным результатом также является экспериментальная проверка известных и разработка новых численных моделей.

**Диссертационная работа** состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка использованных источников из 153 наименований, качество и количество которых указывает на осведомлённость диссертанта по изучаемой теме. Объем диссертации составляет 182 страницы, и она содержит 86 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность диссертации, сформулированы цели исследования и научные задачи, а также указаны используемые для их решения методы и определены новые научные результаты, обоснована их практическая значимость и достоверность. Приводится список конференций и семинаров, на которых докладывались результаты работы, а также представлен личный вклад Ф.В. Роньшина в диссертационное исследование.

В **главе 1** приведён подробный, хорошо иллюстрированный обзор (77 с.) исследований двухфазных течений в микроканалах. Рассмотрены основные классификации каналов, режимы течения и факторы, влияющие на них. Приведен обзор моделей, описывающих двухфазное течение. Сделан вывод, что необходимо разработать достоверную экспериментальную методику для количественного определения критериев границ между режимами, а также детально исследовать режимы двухфазного течения и перепад давления в широких прямоугольных микроканалах.

В главе 2 описано используемое в экспериментах современное высокоточное сертифицированное оборудование, экспериментальная установка, условия проведения экспериментов, указан рабочий диапазон всех используемых приборов и их технические характеристики. Описана новая методика анализа режимов двухфазного течения в плоских микроканалах.

В главе 3 описано экспериментальное исследование двухфазного течения в микроканалах высотой от 150 до 50 мкм. По результатам серии экспериментов выделены основные и подробно описаны режимы течения: струйный, пузырьковый, раздельный, кольцевой и вспененный. При помощи новой методики на основе количественных критериев определены границы между режимами. Обнаружены новые особенности режимов течения в микроканалах. Обнаружено формирование вертикальных перемычек и капель жидкости в широком диапазоне расходов газа и жидкости. Зафиксированы различные механизмы формирования пленки на верхней стенке микроканала при кольцевом режиме. Проведено исследование гидравлического сопротивления. Рассмотрены классические модели для определения перепада давления на трение, а также выполнено сравнение полученных экспериментальных данных с теорией. Показано, что минимальный перепад давления достигается в раздельном режиме, что важно для технических приложений.

В главе 4 приведены результаты исследований особенностей двухфазного течения в широких прямоугольных микроканалах. Установлено влияние свойств жидкости на режимы двухфазного течения в микроканале и выявлены их основные отличия. Обнаружен режим течения, когда по микроканалу движутся капли, представляющие из себя вертикальные жидкостные перемычки. Выделены механизмы и условия формирования таких капель, а также исследована их деформация. Показано, что высота и ширина микроканала оказывают существенное влияние на режим двухфазного течения. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с моделями, имеющимися в литературе, и отмечено, что такие модели неприменимы к плоским микроканалам. Выявлены закономерности формирования кольцевого режима (структурирование струй жидкости по каналу) и предложена модель, описывающая переход от раздельного режима к кольцевому.

Выводы по диссертации приведены по главам, основные результаты и рекомендации сформулированы в заключении.

**Научная новизна и практическая значимость результатов работы** заключается в следующем:

- Разработана новая методика измерения характеристик двухфазного потока в плоских микроканалах, основанная на анализе изображений фрагментов двухфазных течений (пузырьков, капель, областей пленки на стенках канала). Впервые проведены эксперименты в широких (10-40 мм) микроканалах высотой от 150 до 50 мкм. Предложен новый способ определения границ режимов двухфазного течения на основе количественных критериев, полученных при помощи разработанной методики.

- В плоских микроканалах высотой 150 мкм и менее обнаружен капельный режим течения, когда по микроканалу движутся капли, представляющие из себя вертикальные жидкостные перемычки. Выделены три механизма формирования таких капель: вследствие разрушения горизонтальных жидкостных перемычек, отделение капли от жидкости, движущейся по боковым сторонам канала, и формирование непосредственно возле сопла жидкости. Установлены критические числа  $We_{SG}$ , при которых капли начинают деформироваться и разрушаются. Предложена новая классификация режимов: пузырьковый (по каналу движутся пузырьки газа), инверсионный или капельный (когда в классических режимах наблюдается движение капель жидкости, представляющих из себя вертикальные жидкостные перемычки) и раздельный режим, не содержащий капель. Обнаружено, что область капельного режима течения существенно зависит от размеров канала и смачиваемости поверхности.

- Выявлено, что ширина микроканала оказывает существенное влияние на характеристики двухфазного течения и приводит к появлению новых режимов течения и их неустойчивости. Выявлены новые закономерности влияния ширины канала на переход к кольцевому режиму. Предложена модель для перехода от раздельного к кольцевому режиму, базирующаяся на обнаруженном факте, - структурировании струй жидкости по каналу.

- Проведено исследование перепада давления в канале  $0,15 \times 10$  мм. Исследована зависимость перепада давления пленочных режимов течения от массового газосодержания. Показано, что минимальный перепад давления достигается в раздельном режиме, что важно для технических приложений.

Разработанная методика может быть применена для анализа режимов течения и переходов между ними. Полученные и обработанные с использованием новейших программно-алгоритмических средств результаты экспериментального исследования режимов двухфазных течений в плоских микроканалах могут быть применены при разработке систем охлаждения электронного оборудования. Полученные фундаментальные знания о формировании режимов течения, их особенностях и перепаде давления являются полезными для широкого круга технических приложений. Разработана модель перехода от раздельного режима течения к кольцевому, которая может быть использована при проектировании систем охлаждения.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием современных методов диагностики, анализом погрешностей измерений, проведением калибровочных и тестовых экспериментов. Выделенные экспериментальные режимы характеризуются хорошей воспроизводимостью и согласуются с результатами работ других авторов.

В качестве замечаний по диссертации можно отметить следующие:

1. Автор приводит описание новой методики анализа переходов между режимами двухфазных течений в микроканалах. Следовало бы более подробно проанализировать неопределенности границ режимов. Также не указана применимость этой методики.

2. Во второй главе, на наш взгляд, следовало бы уделить больше внимания механизмам формирования режимов двухфазных течений.
3. В работе указано, что смачиваемость существенно влияет на формирование режимов двухфазных течений в микроканалах. При этом измерения краевых углов проводились, но не менялась смачиваемость самой поверхности.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера, диссертация Ф.В. Роньшина заслуживает положительной оценки. Представленное исследование оригинально, основательно, содержит новое решение актуальных задач в области исследования течений в микроканалах. Получен ряд новых научных результатов, имеющих важное практическое значение, широко апробированных на конференциях и семинарах и опубликованных в 15 рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК. Автореферат диссертации полно отражает ее содержание и основные результаты.

### **Заключение**

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Роньшина Федора Валерьевича «Двухфазные течения в коротких прямоугольных микроканалах» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-методическом уровне и соответствует специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Результаты, полученные в диссертации, имеют важное научное и прикладное значение, вносят существенный вклад в развитие систем охлаждения. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 725 от 30 июля 2014 г. и №335 от 21 апреля 2016 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Роньшин Федор Валерьевич – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в российских образовательных и научных организациях, проводящих исследования в области двухфазных течений (МГУ, МЭИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, СПбПУ, ТПУ и др.), при проектировании и разработке систем охлаждения, в том числе для охлаждения микропроцессоров.

Содержание диссертации обсуждено на семинаре лаборатории фазовых переходов и неравновесных процессов в Институте теплофизики УрО РАН

1 февраля 2019 г. (протокол № 2).

Решетников Александр Васильевич,

д. ф.-м. н. (01.04.14), ведущий научный сотрудник

лаборатории фазовых переходов и неравновесных процессов

ФГБУН ИТФ УрО РАН

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107А, к. 201

e-mail: reshav@itp.uran.ru, т. (343)267-88-03

*Решет*

*11 февраля 2019 г.*