


«УТВЕРЖДАЮ»

врио директора ИМех УНЦ РАН,  
доктор физико-математических наук,  
профессор  С.Ф. Урманчеев

О Т З Ы В

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра Российской академии наук на диссертационную работу *Агеева Алексея Игоревича «Течения вязкой жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей»*, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности *01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы*

Интерес к исследованию гидродинамических особенностей течений вязкой жидкости по супергидрофобным поверхностям связан с **актуальной** проблемой снижения сопротивления трения с использованием покрытий, самоочищающихся от микрзагрязнений за счет эффекта макроскопического проскальзывания, и обусловлен развитием нанотехнологий, используемых при создании поверхностей с контролируемой шероховатостью.

В диссертационной работе Агеева А.И. разработаны и построены решения для автомодельных режимов нестационарного и стационарного растекания тонкого слоя вязкой жидкости от локализованного источника по неоднородным супергидрофобным поверхностям (горизонтальным, наклонным или цилиндрическим) при различных законах массоподвода в слой (степенном или экспоненциальном). Разработан и реализован численный метод, основанный на методе граничных интегральных уравнений, моделирующий стоксово обтекание элементов периодической микроструктуры супергидрофобных поверхностей в виде прямоугольных каверн, содержащих газовую фазу. **Проведено обоснование** и тестирование предложенного метода. Решения исследуемых задач реализованы в виде комплекса программ, включаю-

щих **оценки достоверности**, проведенные на основе обработки полученных результатов с контролем точности и сравнения полученных решений с данными других авторов.

**Научная новизна** основных результатов состоит в построении и исследовании ряда автомодельных решений нестационарных задач о растекании тонкого слоя вязкой жидкости в поле силы тяжести по неоднородной супергидрофобной поверхности при наличии линейного и точечного источников нестационарного закона массоподвода в слой; в разработке с использованием метода граничных интегральных уравнений метода численного решения задач о стоксовых течениях в окрестности прямоугольной каверны, заполненной газом; в новом подходе для исследования (с привлечением параметрического анализа осредненного коэффициента скольжения жидкости) обтекания сдвиговым потоком элемента периодической структуры, моделирующей супергидрофобную поверхность при условии не совпадения края каверны и границы пузырька.

**Практическая значимость** работы заключается в возможности использования полученных автомодельных решений течения стоксовой пленки, определяющей закономерности поведения пятна смачивания, для экспериментальной разработки дизайна промышленных супергидрофобных поверхностей; для изучения свойств самоочищения, необходимых для предотвращения обледенения элементов конструкций и линий электропередач. Разработанный на основе метода граничных интегральных уравнений комплекс компьютерных программ для двумерных стоксовых течений также может быть использован для промышленной разработки супергидрофобных материалов с эффективным скольжением.

Результаты, представленные в диссертационной работе, судя по публикациям и широкому обсуждению работы на российских и международных конференциях и съездах, а также по многочисленным наградам, полученным автором за результаты, изложенные в диссертации, получили одобрение на-

учной общественности. **Личный вклад автора** состоит в участии в постановке задач, в разработке оригинальных численных алгоритмов, проведении численного и параметрического анализа полученных результатов, в участии в написании статей и представлении полученных результатов на научных конференциях и семинарах.

**По структуре** диссертация состоит из введения, обзора литературы, двух глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 118 страниц. Список литературы включает 134 наименования.

Во **введении** представлена тематика исследований гидродинамических свойств супергидрофобных поверхностей, обоснована цель, научная новизна, актуальность и практическая значимость работы.

Далее представлен **обзор литературы**, касающейся свойств супергидрофобных поверхностей, способных обеспечивать эффективное проскальзывание при течении жидкости по такой поверхности. Отмечены результаты экспериментальных работ по снижению трения на супергидрофобных поверхностях. Приведены методики, используемые для определения числовых значений компонент тензора скольжения, отмечены решения макроскопических задач о течении вязкой жидкости с граничным условием проскальзывания типа Навье, применяемые при обработке экспериментальных измерений. Изложены основные проблемы, возникающие при решении рассматриваемых задач. Показано, что в литературе отсутствуют исследования, касающиеся влияния формы межфазной поверхности и ее положения относительно границ микрокаверн и газовых пузырьков на величину осредненного проскальзывания. Обоснована необходимость развития универсального подхода для детального параметрического исследования течения на микроуровне для произвольных каверн и форм межфазной поверхности.

**В первой главе** решены макроскопические задачи о течении тонкого слоя вязкой жидкости вдоль супергидрофобной поверхности с граничным

условием эффективного проскальзывания Навье и заданным тензором скольжения. Установлены критерии существования автомодельных решений для неоднородных супергидрофобных поверхностей, определены характеристики течений, с помощью которых могут быть определены компоненты тензора скольжения. Исследованы автомодельные законы движения переднего фронта смачивания. Установлено взаимно-однозначное соответствие между параметрами скольжения и законами движения переднего фронта. Анализ решения задачи об установившемся стекании ручейка жидкости по наклонной неоднородной супергидрофобной поверхности показал, что информации об области смачивания недостаточно: для определения эффективных характеристик поверхности необходимо дополнительно фиксировать толщину слоя на оси симметрии ручейка. В результате математического моделирования начальной стадии процесса стекания тонкого слоя жидкости по поверхности горизонтального супергидрофобного цилиндра показано, что проскальзывание значительно уменьшает время стекания слоя. Решения автомодельных задач о течении тонкого слоя вязкой жидкости по супергидрофобной поверхности были сопоставлены с уже известными решениями (Huppert, Lister, Осипцов А.А.), в которых были построены автомодельные решения для задач растекания тонкого слоя жидкости на обычной поверхности без проскальзывания.

**Во второй главе** проведено параметрическое численное исследование эффективной длины скольжения на основе решения двумерной гидродинамической задачи обтекания вязкой жидкостью элемента текстуры супергидрофобной поверхности с использованием осредненного условия проскальзывания на стенке. Для вычисления полей скоростей в области над текстурой, занятой жидкостью, разработан эффективный численный алгоритм, основанный на методе граничных интегральных уравнений для задач стоковой гидродинамики. Проведено тестирование алгоритма и получено совпадение расчетов с известными решениями. В случае сдвигового потока получены монотонные зависимости эффективного скольжения от геометрических пара-

метров текстуры. Учет таких геометрических параметров, как форма мениска и его положения относительно стенок каверны, приводит к значительному уменьшению эффективного скольжения. Разработанный численный алгоритм может быть применен для расчетов эффективного скольжения для супергидрофобных поверхностей с кавернами произвольной формы.

**В приложении** диссертации приведен подробный вывод граничных интегральных уравнений, эквивалентных уравнениям Стокса для двумерных задач в прямоугольной декартовой системе координат.

#### **Замечания по содержанию диссертации.**

1. На с. 14 к рис. 2. отсутствуют пояснения к каждому из 4-х фрагментов. Отсюда неясно, какой из фрагментов соответствует состоянию Касси.
2. На рисунках в первой главе, например, 1.2-1.4, 1.9 приводятся результаты решения для автомодельных функций в безразмерном виде. Такое представление сложно интерпретировать с точки зрения физической наглядности полученного решения. Считаем, что более информативными были бы рисунки в размерных переменных, тем более что в диссертации приведены полученные решения в размерных переменных (например, на с.с. 47, 64).
3. В Заключение некоторые выводы имеют тривиальный смысл. Например, на с. 94: «Показано, что проскальзывание на супергидрофобной поверхности значительно уменьшает время стекания слоя по сравнению с обычной цилиндрической поверхностью (без проскальзывания)». Очевидно, что при данной формулировке было бы целесообразно привести количественные оценки.
4. С точки зрения возможных приложений в работе уделено недостаточно внимания влиянию ориентации текстуры поверхности относительно направления потока жидкости. Вызывает интерес течение в

пограничном слое, обусловленным характером текстуры, и его взаимодействием с основным потоком.

### **Заключение.**

Диссертация Агеева А.И. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. В работе получены результаты, позволяющие квалифицировать их как решение ряда новых задач и получение новых знаний в области гидромеханики.

Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа базируется на достаточном числе примеров и расчетов в пространстве параметров соответствующих задач. Стиль изложения диссертации четкий и ясный, работа грамотно и аккуратно оформлена. Каждая глава диссертации завершается обстоятельными выводами.

Сделанные замечания ни в коей мере не умаляют достоинств выполненной работы.

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы при анализе природных явлений, при создании новых материалов в различных областях их применения, а также при создании теоретических основ микро- и нанотехнологий.

Материалы диссертационной работы могут быть востребованы в ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, ИМех МГУ, ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН, ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН, ИГ им. М.А. Лаврентьева СО РАН, ИМех им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, ИММ КазНЦ РАН, ИМАШ им. А.А.Благоднарова РАН, ИПМАШ РАН, ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, ЦАГИ, ЦИАМ, а также в других академических институтах и проектных организациях. Материалы диссертации могут быть использованы в университетских учебных курсах по специальным разделам гидромеханики и теоретическим основам технологических процессов.

Научные положения и результаты, полученные автором, опубликованы в 18 научных трудах, в том числе в 3-х журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Содержание автореферата соответствует цели, задачам, основным выводам и рекомендациям диссертационной работы.

По актуальности, научной новизне и практической значимости результатов, обоснованности выводов и положений, представленная диссертация соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК при Минобрнауки России, а ее автор, Агеев Алексей Игоревич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на научном семинаре 10.02.2016, а отзыв утвержден на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт механики им. Мавлютова Р.Р. Уфимского научного центра Российской академии наук (протокол № 2 от 11.02.2016 г.).

Главный научный сотрудник  
лаборатории механики многофазных систем  
ИМех УНЦ РАН, доктор физ.-мат. наук

*Болотнова* Р.Х. Болотнова

Болотнова Раиса Хакимовна,  
ФГБУН Институт механики им. Р.Р. Мавлютова  
Уфимского научного центра  
Российской академии наук,  
адрес: 450054, г. Уфа, Проспект Октября, 71  
тел. +7-347-2355255  
e-mail: [bolotnova@anrb.ru](mailto:bolotnova@anrb.ru)

*Подпись*  
*Бед.*

*Р.Х.*



*Закреплено:*

*Булдеева Л.С.*

*14.02.2016*