

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию А.И. Агеева
«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.

Актуальность темы. Диссертация Алексея Игоревича Агеева посвящена развитию методов определения гидродинамических характеристик текстурированных супергидрофобных поверхностей, область использования которых быстро расширяется в последнее десятилетие. Такой интерес к супергидрофобным поверхностям обусловлен их свойствами, важными для целого ряда приложений – это и повышенная защита от смачивания, и самоочистка от жидких загрязнений, и предотвращение обледенения, и др. На супергидрофобной поверхности имеются микролунки, занятые миниатюрными газовыми пузырьками, что приводит к резкому снижению трения при движении вязкой жидкости вдоль такой поверхности из-за практически нулевого касательного напряжения на границе жидкость-газ. Это свойство супергидрофобных поверхностей особенно важно для снижения сопротивления при транспортировке жидкостей по трубам и каналам и в задачах внешнего обтекания таких поверхностей вязкой жидкостью. Основной целью работы является определение эффективных (осредненных) коэффициентов тензора скольжения, входящих в условие проскальзывания Навье, обычно используемое в качестве граничного условия для скорости жидкости на супергидрофобной поверхности. Диссертант предлагает два различных подхода к определению коэффициентов скольжения. Первый подход связан с решением нескольких задач о течениях тонкого слоя тяжелой вязкой жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей с граничным условием проскальзывания при заданных коэффициентах скольжения. При этом автору удалось выбрать задачи, представляющие самостоятельный интерес, и получить решения в

достаточно простой форме, позволяющей в будущем провести специальные эксперименты для определения коэффициентов скольжения по измеряемым в эксперименте параметрам (например, закону распространения пятна смачивания). Второй подход к определению эффективных параметров скольжения состоит в решении гидродинамической задачи стокового обтекания периодической системы двумерных каверн, занятых микропузырьками, и последующем осреднении полученного решения. Здесь автору удалось использовать очень элегантный метод граничных интегральных уравнений, особенно подходящий для решения задач в областях сложной формы со смешанными граничными условиями. Таким образом, тематика диссертации несомненно является **актуальной и современной**.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации. Автор использует четкие гидродинамические постановки задач – несущая фаза описывается уравнениями Навье-Стокса (или Стокса). В первой части работы используется хорошо апробированное приближение тонкого слоя. Даны необходимые оценки возможности пренебрежения эффектами поверхностного натяжения для рассматриваемых условий течения пленок жидкости. Все постановки задач основаны на законах сохранения и являются вполне обоснованными для рассматриваемых условий течений. Численные алгоритмы содержат необходимый контроль точности. Автор многократно тестирует разработанные численные алгоритмы и проводит, где это возможно, сравнение полученных численных расчетов профилей скорости, линий тока, параметров скольжения с предельными аналитическими формулами, а также численными результатами других авторов. Все это позволяет заключить, что основные результаты диссертации являются **вполне обоснованными**.

Оценка содержания, а также новизны и достоверности полученных результатов.

Диссертация изложена на 118 стр, она содержит введение, обзор литературы, две главы, заключение, список литературы и приложение. В работе имеется 33 рисунка, 4 таблицы и 134 библиографические ссылки.

Наиболее существенными результатами диссертации являются следующие:

– В приближении тонкого слоя вязкой жидкости впервые построены и исследованы задачи эволюции слоя тяжелой жидкости на (в общем случае, неоднородных) супергидрофобных поверхностях с использованием граничного условия проскальзывания;

- построены и исследованы автомодельные решения задач растекания тонкого слоя тяжелой жидкости от заданного линейного или точечного источников массоподвода на неоднородной горизонтальной супергидрофобной плоскости при степенном и экспоненциальном (по времени) законах массоподвода и степенной зависимости коэффициента проскальзывания от продольной координаты;

– исследована задача о стационарном стекании ручейка вязкой жидкой по наклонной неоднородной супергидрофобной поверхности от точечного источника;

- проведены расчеты начальной стадии эволюции тонкого слоя вязкой жидкости на цилиндрической однородной супергидрофобной поверхности, ось которой перпендикулярна направлению силы тяжести.

Решения перечисленных задач представлены в достаточно простом виде, позволяющем проведение специальных экспериментов, в которых по форме пятна смачивания можно будет определять коэффициенты скольжения промышленных супергидрофобных поверхностей.

– С использованием метода граничных интегральных уравнений разработан численный алгоритм для расчета стационарных стоксовых течений в окрестности двумерной каверны, содержащей микропузырек газа.

– Впервые исследовано обтекание элемента периодической структуры супергидрофобной поверхности сдвиговым потоком в наиболее общей

ситуации, когда каверна лишь частично занята газовым пузырьком. Проведено параметрическое численное исследование структуры течения в окрестности каверны и осредненного коэффициента скольжения жидкости. Показано, что коэффициент скольжения существенно уменьшается при уменьшении объема пузырька и перемещения межфазной границы вглубь каверны. Таким образом, фактически показано, что эффективное скольжение и эффект снижения сопротивления должен существенно зависеть и от нормальных напряжений (локального давления) на супергидрофобной поверхности.

Перечисленные результаты являются новыми, их достоверность не вызывает сомнений.

Полученные решения автомодельных задач представляют несомненный практический интерес для разработки методов сертификации промышленных супергидрофобных поверхностей. Развитый в диссертации метод граничных интегральных уравнений может быть востребован в других научных коллективах, занимающихся исследованием супергидрофобных поверхностей, в частности, в Институте физической химии РАН (Москва), Институте гидродинамики РАН (Новосибирск) и др.

По содержанию и тексту диссертации можно высказать **ряд замечаний и сформулировать несколько дискуссионных моментов:**

- 1) В работе приводятся сопоставления выполненных автором расчетов с известным аналитическими и численными решениями, что подтверждает сходимость и непротиворечивость полученных результатов в рамках используемых приближенных математических моделей течения вязкой жидкости. Однако отсутствует верификация по экспериментальным данным, что не позволяет априори утверждать, что предложенные модели адекватно описывают реальные течения по супергидрофобным поверхностям, а так же оценить возможную погрешность таких расчетов.

- 2) Следовало бы более подробно пояснить схему возможных экспериментов для определения коэффициентов скольжения неоднородных поверхностей с использованием полученных автомоделных решений, а именно – как выбирать закон массопотока в пленку при заранее неизвестной зависимости коэффициента скольжения от координаты?
- 3) Следовало бы провести специальное исследование устойчивости переднего фронта смачивания на супергидрофобной поверхности с условием проскальзывания. Ведь возможно, что на переднем фронте быстро развивается ручейковая неустойчивость, ограничивающая диапазон применимости полученных автомоделных решений.
- 4) Следовало бы дать более детальную оценку границ применимости используемых стационарных уравнений Стокса для описания течения на микромасштабе (масштабе микролунок с газовыми пузырьками). В частности – возможно ли использовать это приближение для быстрых (или даже турбулентных) течений вдали от стенки?
- 5) В главе второй применяемый автором диссертации метод граничных интегральных уравнений описан достаточно скупо. Не приводятся данные о числе граничных элементов, не представлены результаты проверки сходимости численного метода по сетке и т.п. Разработанные вычислительные программы автору следовало бы оформить как программный продукт и получить соответствующие свидетельства.

Указанные замечания не снижают ценности работы в целом, а являются скорее пожеланиями для направлений дальнейших исследований. Диссертация Агеева Алексея Игоревича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. В диссертации решен ряд новых задач о течении тонких слоев жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей, представляющих самостоятельный интерес, и развиты новые подходы к определению коэффициентов гидродинамического скольжения

неоднородных и однородных супергидрофобных поверхностей. Автореферат аккуратно оформлен, он полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты докладывались на крупных российских и международных конференциях и опубликованы в 18 научных работах, в том числе в 3 статьях в журналах из списка ВАК. Следует отметить, что результаты автора позволили ему получать финансовую поддержку ряда фондов и программ, в частности, молодежного научно-инновационного конкурса У.М.Н.И.К.

Полученные в диссертации результаты несомненно будут использованы для экспериментального и теоретического анализа гидродинамических характеристик супергидрофобных поверхностей. Диссертация А.И. Агеева удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник Института водных проблем РАН
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3
Тел.: (499) 135-54-56, Факс: (499) 135-54-15
e-mail: tina@iwp.ru

доктор технических наук
тел.: (910) 440-42-00, e-mail: belvv@bk.ru)

24.02.2016 

Беликов Виталий Васильевич

Подпись: Тюдишев В. В.
заведующий кафедрой /Перергемас/

