

Отзыв официального оппонента  
на диссертационную работу Агеева Алексея Игоревича  
«Течения вязкой жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей»  
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

**Актуальность темы**

Диссертация Агеева А.И. посвящена численному исследованию течения вязкой жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей. Актуальность этого исследования обусловлена рядом необычных свойств течений жидкости вблизи текстурированных супергидрофобных поверхностей, которые могут представлять практический интерес. Обтекание вязкой жидкостью супергидрофобной поверхности приводит к макроскопическому проскальзыванию и заметному снижению сопротивлению трению потока. Подобные поверхности активно используются для снижения сопротивления, интенсификации массопереноса в устройствах микрофлюидики, в химической технологии, при создании покрытий, самоочищающихся от капельных загрязнений, для предотвращения обледенения элементов летательных аппаратов и технологических конструкций и др.

В связи с вышесказанным большую важность представляет разработка численных моделей для описать течение вязкой жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей. Существенным и до сих пор открытым в данной задаче является вопрос описания областей прилипания и проскальзывания на криволинейной поверхности пузырька. В существовавших до сегодняшнего дня моделях не учитывались кривизна поверхности пузырька и возможное смещение поверхности пузырька вглубь каверны. Также большую важность представляет построение аналитических решений, описывающих течение жидкости по неоднородным супергидрофобным поверхностям, с помощью которых можно было бы определять коэффициенты скольжения поверхности из экспериментов по определению скорости растекания жидкой пленки. Поэтому, несомненно, тема представленной диссертационной работы, посвященной исследованию течения вязкой жидкости вдоль супергидрофобной поверхности, является актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Обоснованность положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе Агеева А.И. обеспечена использованием фундаментальных положений механики сплошных сред, уравнений Навье-Стокса и граничного условия проскальзывания типа Навье. Приближенные методы решения обоснованы, а для построенных моделей определены условия их применимости. В численных методах использованы известные и хорошо апробированные алгоритмы. Выводы диссертации сформулированы в соответствии с обоснованными решениями теоретических задач.

## Новизна и достоверность

Целью диссертационной работы Агеева А.И. является теоретическое исследование течений вязкой жидкости вблизи супергидрофобных поверхностей. Для достижения поставленной цели автор строит модели на основе уравнений гидродинамики, аналитически решает задачи описания течения жидкости по неоднородным супергидрофобным поверхностям, численно решает задачу об учете кривизны поверхности пузырька при течении жидкости в микроканале с супергидрофобной стенкой при малых числах Рейнольдса, исследует характер течения при различных входных параметрах. В рассмотрение включены геометрические параметры микрокаверны, кривизна межфазной границы и степень заглубления межфазной границы в микрокаверну. В результате исследования определяется осредненный коэффициент скольжения супергидрофобных поверхностей, входящий в эффективное граничное условие проскальзывания типа Навье.

В диссертации получены следующие новые результаты:

- В задаче о нестационарном растекании тонкого слоя тяжелой вязкой жидкости вдоль горизонтальной супергидрофобной поверхности от локализованного источника, мощность которого задана степенной либо экспоненциальной функцией времени, исследованы автомодельные законы движения переднего фронта смачивания в зависимости от параметров, задающих величину проскальзывания скорости. Показано, что проскальзывание на поверхности увеличивает расстояние, которое проходит передний фронт слоя при растекании жидкости. Установлено взаимно однозначное соответствие между параметрами скольжения, характеризующими супергидрофобную поверхность, и законом движения переднего фронта. Проведено обобщение полученных автомодельных решений на случай слабой зависимости решения от второй пространственной координаты, когда можно пренебречь трансверсальным перетеканием жидкости в движущейся пленке.

- На основе проведенного параметрического исследования области смачивания, образующейся при установившемся стекании ручейка жидкости по наклонной супергидрофобной поверхности, установлено, что для такой геометрии течения информации только об области смачивания недостаточно, чтобы однозначно определить эффективные характеристики супергидрофобной поверхности. Необходимо также фиксировать толщину слоя на оси симметрии ручейка.

- Выполнено математическое моделирование начального этапа стекания тонкого слоя жидкости по супергидрофобной поверхности горизонтального цилиндра. Проанализировано взаимно однозначное соответствие между временем утончения слоя и величиной проскальзывания, что может быть использовано при экспериментальном определении компонент тензора скольжения супергидрофобных поверхностей с постоянным проскальзыванием.

- Решена двумерная задача об установившемся стоксовом обтекании вязкой жидкостью элементов микротекстуры супергидрофобной поверхности в наиболее общей постановке, когда угловые точки межфазной границы, образующейся между газовым пузырем и жидкостью, не совпадают с угловыми точками каверны.

- Проведено параметрическое численное исследование эффективной длины скольжения вязкой жидкости над текстурой супергидрофобной поверхности в сдвиговом потоке. Эффективное скольжение вычислялось из осредненного по периоду текстуры локального условия проскальзывания Навье. Получены зависимости эффективного скольжения от различных геометрических параметров текстуры: доли газового участка, формы мениска и его положения относительно стенок каверны.

- Разработанный метод расчета эффективного скольжения из решения задачи обтекания системы каверн может быть использован для получения оценок величины эффективного скольжения над периодической текстурой супергидрофобной поверхности, состоящей из близко расположенных микрокаверн, когда предположение о сдвиговости потока в области между кавернами нарушается. Кроме того, разработанный численный алгоритм применим для вычисления эффективного скольжения для супергидрофобных поверхностей с текстурами, образованных кавернами произвольной формы.

### **Замечания по работе**

1. Следовало бы уделить большее внимание связи коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  [стр. 40, ур. (1.1.9)] и пояснить, как в эксперименте для пленок может быть реализован источник, подающий жидкость по экспоненциальному закону, или же гидрофобная поверхность с переменными гидрофобными свойствами.
2. В главе 2, следовало бы обсудить возможность самосогласования между кривизной межфазной поверхности и непосредственно самим течением, то есть влияние течения жидкости на форму межфазной поверхности и наоборот.
3. В диссертации недостаточно подробно описана реализация использованного численного алгоритма для решения задачи о течении вязкой жидкости вдоль межфазной границы, что мешает его проверке другими исследователями и ограничивает возможность верификации и воспроизводимости результатов.

### **Общие выводы по диссертации**

Оценивая диссертационную работу в целом, можно констатировать ее несомненную актуальность и научную новизну. Полученные результаты и выводы достоверны и обоснованы на современном научном уровне. Основные положения выполненных исследований опубликованы в журналах,

рекомендованных ВАК РФ, доложены на представительных научных конференциях и получены лично автором. Автореферат, составленный с соблюдением установленных требований, в достаточной степени отражает содержание диссертации. Следует отметить, что вышеперечисленные недостатки не умаляют достоинств диссертационной работы.

Проведенный анализ диссертационной работы Агеева Алексея Игоревича позволяет сделать вывод о том, что она является законченной научно-квалификационной работой, в которой решен ряд задач обтекания вязкой жидкостью супергидрофобной поверхности, имеющих существенное значение для гидродинамики.

Диссертационная работа Агеева Алексея Игоревича «Течения вязкой жидкости вдоль супергидрофобных поверхностей» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, а сам А.И. Агеев достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,  
директор Центра проектирования, производственных технологий и материалов  
Сколковского института науки и технологии, Москва

**Ахатов Искандер Шаукатович**



18/02/2016

Почтовый адрес: 143025, Российская Федерация,  
Московская область, Одинцовский район,  
дер. Сколково, ул. Новая, д.100  
Телефон: +7(495) 280-14-81 доб. 3317  
Электронная почта: i.akhatov@skoltech.ru

Подпись Ахатова И.Ш. заверяю:

*Менеджер по персоналу Искандер Шаукатович*  
*и кандидат наук Александр Николаевич*  
*Александр Николаевич*

