О.П. Орлов, А.В. Сверчков ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДООТТАЛКИВАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ

Объект и цель научной работы. Исследование силы трения на несмачивающихся (гидрофобных) покрытиях на обтекаемой поверхности и их отличия от сил на смачиваемых поверхностях в одинаковых условиях опытов.

Материалы и методы. В опытовом бассейне применительно к турбулентному режиму течения выполнены сопоставительные экспериментальные исследования на вращающихся дисках, имеющих традиционные и водоотталкивающие (гидрофобные) покрытия.

Основные результаты. Гидрофобные свойства покрытия не влияют на сопротивление трения обтекаемой поверхности. Определяющее влияние на сопротивление трения имеет шероховатость поверхности, которая зависит как от физических свойств используемого покрытия, так и от тщательности его обработки (шлифовки, полировки) исследуемой поверхности.

Заключение. Полученные в работе экспериментальные данные о силах трения на гидродинамически гладкой поверхности практически совпадают с каноническими результатами испытаний дисков, представленными Г. Шлихтингом. Изменение сил трения на дисках при различных видах покрытий связано исключительно с изменением высоты элементов шероховатости на исследуемой поверхности. В результате есть все основания утверждать, что свойство гидрофобности покрытия не приводит к снижению сопротивления трения транспортных судов.

Ключевые слова: гидрофобность, испытания вращающихся дисков, снижение сопротивления трения.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Орлов О.П., Сверчков А.В. Оценка возможности применения водоотталкивающих покрытий для снижения гидродинамического сопротивления транспортных судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 1(383): 43–59.

УДК 629.55:532.5.013+629.5.081.21

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59

O. Orlov, A. Sverchkov

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ASSESSING THE POSSIBILITY OF APPLYING HYDROPHOBIC COATINGS TO REDUCE HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF CARGO CARRIERS

Object and purpose of research. Friction force studies on non-wetting (hydrophobic) coatings applied on a surface in the flow and analysis of their difference from the forces on wetting surfaces in the same experimental conditions.

Materials and methods. Comparative experimental studies were performed in the test tank by means of rotating disks (with traditional and hydrophobic coatings) in turbulent flow.

Main results. Hydrophobic properties of the coating have no effect upon friction resistance of the surface in the flow. Friction resistance mainly depends on surface roughness that depends on both physical properties of the coating in use and on processing quality (grinding, polishing) of the surface under investigation.

Conclusion. The test data about friction forces on hydrodynamically smooth surface obtained in this study practically coincide with classical results of disk tests presented by H. Schlichting. The change in friction forces on these disks with different types of coatings is exclusively due to the changes in height of roughness elements on the surface at question. As a result, there are all the grounds to say that hydrophoby of coating does not reduce friction resistance of cargo carriers.

Key words: hydrophoby, tests on rotating disks, friction resistance reduction.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Orlov O., Sverchkov A. Assessing the possibility of applying hydrophobic coatings to reduce hydrodynamic resistance of cargo carriers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 1(383): 43–59 (in Russian).

УДК 629.55:532.5.013+629.5.081.21

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59

🔯 ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Введение

Introduction

После того, как в конце 90-х гг. прошлого века было открыто физическое явление сверхгидрофобности листа лотоса [1, 2], которое позволяет ему всегда оставаться сухим после контактов с водой, ученые многих стран мира пытаются воспроизвести этот эффект, используя нано- и микротехнологии для разработки различных структур наноповерхностей, отталкивающих воду, предполагая, что на гидрофобной поверхности могут быть уменьшены силы поверхностного трения.

Несмачиваемость поверхности каплями жидкости обеспечивается, например, использованием разнообразных искусственных наноструктурных образований на поверхности тела, таких как:

- пилообразные риблеты по патентам US4986496, US5054412, AT508274, EP2261117, ES2322839, FR2933026 и публикациям WO2009083622, WO2015001315, KR20120001486;
- риблеты в виде трапеций по публикации US2010166964;
- волнообразные риблеты по патентам US5476056, CN1049396, EP0616940;
- вертикальные иглы и наностолбики различной формы, в том числе и «нанотрава» по патентам US7156032, RU2276036 и публикациям US2011070421, US2015273791, US20050039661, WO2014165106;
- наноструктура с углублениями овальной или прямоугольной формы по патентам US7650848, US8997672;
- наноструктура в виде лепестков по патенту US8794574.

Авторы патентов и производители водоотталкивающих красок предлагают использовать гидрофобные покрытия в различных областях науки и техники, включая судостроение, для снижения сопротивления трения корпуса.

Опубликовано множество статей, посвященных исследованиям влияния гидрофобных и сверхгидрофобных покрытий на сопротивление трения на различных поверхностях. Наряду с теоретическими расчетами [3–7], основанными на решении уравнений Навье – Стокса, приводятся результаты многочисленных экспериментальных исследований [8– 22, 28, 34]. Следует отметить, что практически все представленные в технической литературе результаты опытов получены в гидродинамических каналах и трубах университетских лабораторных комплексов, имеющих небольшие размеры как в поперечном сечении, так и по длине рабочего участка. В большей части экспериментов исследовалось течение в трубах с различной формой поперечного сечения или течение между параллельными пластинами. Отдельные эксперименты, как, например, [19], проводились на вращающихся цилиндрах, вращающихся дисках [22] или с использованием опускающихся в воде сферических тел [18, 21]. Как правило, исследуемые скорости течения также были невелики и соответствовали значениям чисел Рейнольдса (Rn), характерным для ламинарных течений или течений в переходной области.

Критические числа Рейнольдса, которые определяют границу перехода от ламинарного течения к турбулентному, в разных формах течения имеют различные числовые значения. Для наиболее распространенных форм течения жидкости числа Рейнольдса определяются соотношениями, приведенными ниже [27].

Для течения в трубах, имеющих круглое поперечное сечение:

$$\operatorname{Rn} = \frac{\overline{U}D}{\nu}.$$
 (1)

где \overline{U} – средняя скорость течения в трубе, м/с; D – диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость воды (зависит от температуры и солености), м²/с.

Для плоских пластин и судов при прямолинейном поступательном движении:

$$Rn = \frac{VL}{v}.$$
 (2)

где V – скорость поступательного движения, м/с; L – характерная длина (в случае судна это длина корпуса по ватерлинии), м.

Для вращающихся плоских дисков в неподвижной жидкости:

$$\operatorname{Rn} = \frac{\omega R^2}{v}.$$
(3)

где $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость, рад/с; *R* – радиус диска, м; *n* – число оборотов за секунду.

Согласно данным [27] для гладкой плоской пластины, обтекаемой в продольном направлении, при $Rn < 5,0 \times 10^5$ течение устойчивое ламинарное, а при $Rn > 3,5 \times 10^6$ течение становится полностью турбулентным. Промежуточный диапазон соответствует переходному режиму. Для течения в круглых трубах ламинарное течение сохраняется до $Rn < 2,3 \times 10^3$. Для вращающихся дисков течение



в диапазоне чисел Рейнольдса от 5×10^4 до 7×10^5 может быть ламинарным, переходным и полностью турбулентным (рис. 1). При числах Рейнольдса больше 2×10^6 течение на поверхности диска турбулентное.

Современные морские транспортные суда эксплуатируются в диапазоне чисел Рейнольдса (1–3)×10⁹ (полностью турбулентный режим). Поэтому для судостроителей именно турбулентный режим течения представляет наибольший интерес для понимания возможности и целесообразности практического применения водоотталкивающих поверхностей.

По мнению химиков – разработчиков гидрофобных покрытий, структура как ламинарного, так и турбулентного течения вдоль водоотталкивающей поверхности в пристеночной области должна существенно изменяться, что обусловлено эффектом предполагаемого проскальзывания жидкости на границе с твердым телом. Вместе с тем результаты экспериментальных исследований, опубликованных разными авторами, весьма противоречивы и существенно различаются по достигнутому эффекту. Например, согласно [16], использование водоотталкивающего материала при скоростях течения до 1,1 м/с (чисто ламинарный режим) привело к уменьшению сопротивления трения до 50% по сравнению с исходным покрытием. Результаты испытаний, полученные в работе [21], показывают уменьшение сопротивления на 22%. В работе [13] приводятся сведения о снижении сопротивления при ламинарном течении на 14%. По экспериментальным данным [17], при Rn = 5300 уменьшение сопротивления трения не превышало 11%. Исследование супергидрофобных покрытий при турбулентном течении в канале [34] показало, что может быть достигнуто снижение сопротивления на 10%. Тестирование коммерческих водоотталкивающих покрытий, предназначенных для широкого использования, при низких скоростях выявило совсем незначительное (не более 5%) снижение сопротивления трения [18, 19]. В нескольких работах отмечается, что при числах Рейнольдса, соответствующих переходному режиму, эффективность водоотталкивающего покрытия заметно уменьшается по сравнению с ламинарным течением. Согласно экспериментальным данным [14, 31–33], использование гидрофобного покрытия вообще не оказало влияния и даже привело к некоторому росту сопротивления.

В работе российских авторов [22] приводятся результаты испытаний вращающихся дисков с нанесенным супергидрофобным покрытием, разработанным в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН [23]. По мнению авторов этих исследований, максимальный эффект снижения сопротивления трения достигался при числах Рейнольдса порядка $Rn = 2,5 \times 10^5$ (переходная область) и составлял 46 %. По мере увеличения числа Рейнольдса эффект монотонно снижался, достигая почти нулевого значения при $Rn = 1,0 \times 10^6$ (еще смешанное течение).

Интересные результаты наблюдений представлены в работе [34]. На основании проведенного исследования четырех видов супергидрофобных покрытий при турбулентном течении в канале было обнаружено, что сопротивление трения супергидрофобного покрытия определяется не водоотталкивающими свойствами этого покрытия, не проскальзыванием частиц жидкости на обтекаемой поверхности, а ее шероховатостью, и может быть как больше сопротивления образца, принятого в качестве эталонного, так и меньше. Это согласуется с результатами исследований [32]. В работах [32] и [34], в частности, отмечается, что на гидрофобном покрытии при высоте элементов шероховатости больше 0,10–0,16 толщины ламинарного подслоя турбулентного пограничного слоя с ростом шероховатости на поверхности увеличивается и сопротивление трения.

Одним из немногих опубликованных исследований, в котором говорится о существенном увеличении сопротивления при использовании гидрофобного покрытия, является работа, посвященная буксировочным испытаниям крупноразмерной модели водоизмещающего судна [28]. Размеры модели были выбраны максимально возможными и ограничивались пределами измерительного оборудования опытового бассейна ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Длина модели составляла 12,1 м, ширина - 1,7 м, площадь смоченной поверхности – 23 м², водоизмещение – более 5 м³. Исследования включали буксировочные испытания модели, окрашенной сначала традиционной, а затем сверхгидрофобной краской, в диапазоне чисел Рейнольдса (1,4-2,9)×107. Для обеспечения надежного турбулентного режима обтекания всего корпуса модель была оборудована двумя проволочными турбулизаторами.

В этом эксперименте использовалась сверхгидрофобная краска Ultra-Ever Dry SE, выпускаемая американской компанией UltraTech International, Inc. По данным производителя [26], краска представляет собой двухступенчатый, высыхающий на воздухе материал, придающий поверхности супергидрофобные и суперолеофобные¹ характеристики и выдерживающий жесткие условия в течение длительного периода времени. По мнению разработчиков краски, после нанесения покрытия на нанотекстурированной поверхности образуется геометрический узор с миллиардами пустот, которые улавливают и задерживают воздух, создавая своего рода «воздушный зонтик» [26]. Продукт предназначен для борьбы с обледенением и влагой, ростом бактерий, для ингибирования ржавчины и самоочищения поверхности. Следует отметить, что производители не указывают на то, что эта краска может снижать гидродинамическое сопротивление.

Согласно результатам испытаний крупноразмерной модели [28], при применении сверхгидрофобного покрытия полное сопротивление вырастает на 9-20% (величина зависела от скорости буксировки), при этом сопротивление трения увеличилось на 12-25%. Авторы предположили, что причиной столь значительного роста сопротивления стало изменение структуры поверхности. Микроскопические пузырьки воздуха, которые не давали корпусу модели смачиваться, превратили гидродинамически гладкую поверхность в шероховатую. О наличии пузырьков свидетельствовал тот факт, что при опускании модели в воду ее поверхность, ярко желтого цвета на возлухе, начинала казаться черной, и этот черный цвет не менялся на протяжении всего цикла испытаний. Понятно, что измерить шероховатость пузырьков воздуха было физически невозможно.

В настоящей работе еще раз опытным путем проверена гипотеза разработчиков о способности гидрофобных свойств покрытий приводить к уменьшению сопротивления трения при турбулентном течении в пограничном слое.

Гидрофильность, гидрофобность и сверхгидрофобность

Hydrophily, hydrophoby and super-hydrophoby

Прежде чем перейти к изложению результатов проведенных экспериментальных исследований, следует вспомнить, чем различаются гидрофильные, гидрофобные и сверхгидрофобные покрытия.

Между водой и гладкой поверхностью материала возникает межмолекулярное взаимодействие, называемое смачиванием, при котором жидкая среда должна прилипать к поверхности, и которое можно охарактеризовать краевым углом (углом смачивания) [24]. По величине данного угла определяют, является ли поверхность гидрофильной (угол смачивания – меньше 90°) либо гидрофобной (угол смачивания – более 90°). Если же угол смачивания превышает 150°, поверхность называется сверхгидрофобной. На рис. 2 показаны формы капли воды и углы смачивания Θ на гидрофильной, гидрофобной и сверхгидрофобной поверхностях.

Капля воды, попавшая на сверхгидрофобную поверхность, стремится принять шарообразную форму, так как силы сцепления молекул воды превосходят силы, действующие со стороны поверхности. Площадь контакта с поверхностью крайне мала. Следует заметить, что такие гидрофобные

¹ Благодаря суперолеофобности отработанные масла быстро удаляются с поверхности.



Рис. 2. Взаимодействие капли воды с различными типами поверхностей: *а*) гидрофильная; *б*) гидрофобная; *в*) сверхгидрофобная

Fig. 2. Interaction of water drop with different types of surfaces: a) hydrophilic; b) hydrophobic; c) super-hydrophobic

материалы, как воск и тефлон, характеризуются краевыми углами смачивания не более 120°. Сверхгидрофобная краска Ultra-Ever Dry SE, которая была использована при испытаниях 12-метровой буксировочной модели [28], имела краевой угол смачивания примерно 160–175°. Возвышения на текстурированной поверхности этого покрытия позволяют капелькам воды соприкасаться только с 2-3 % покрытия, соскальзывая по воздушной подушке.

В действительности любая поверхность не является идеально гладкой, а имеет наноскопические шероховатости, способные изменять краевой угол смачивания [25]. Помимо того, что рельеф увеличивает площадь контакта поверхности с каплей, его форма также влияет на ее растекание. На рис. 3 показаны два возможных состояния капли на сверхгидрофобной поверхности. Рельеф поверхности моделируется как сетка из наноскопических столбов. В состоянии Венцеля капля частично смачивает шероховатости. В состоянии Кассье капля не реагирует на рельеф поверхности, имея чрезвычайно малую площадь контакта. Данное явление позволило ученым предположить, что эффект сверхгидрофобности возможно использовать с целью уменьшения сопротивления трения движущихся в воде объектов как в ламинарном, так и в турбулентном режимах течения.

Объекты исследования и измерительное оборудование опытового бассейна при проведении опытов

Test objects and test tank instrumentation used in the experiments

В качестве объектов исследования гидродинамического сопротивления водоотталкивающих покрытий были выбраны вращающиеся диски, что обусловлено следующими факторами. Гидродинамически



Рис. 3. Основные состояния капли на сверхгидрофобной поверхности [25]: *a*) состояние Венцеля (Wenzel); *б*) состояние Кассье (Cassie – Baxter)

Fig. 3. Main states of the drop on super-hydrophobic surface [25]: *a*) Wenzel state; *b*) Cassie – Baxter state

гладкие диски являются хорошо изученным объектом. Основная составляющая сопротивления диска – сопротивление трения. И только используя диски, можно в лабораторных условиях выйти на скорости, соответствующие или превосходящие скорости реальных натурных объектов и обеспечивающие естественный турбулентный режим течения на всей поверхности опытного образца.

Диаметр дисков выбирался с учетом возможностей измерений на имеющемся оборудовании и составил 0,340 м. Было изготовлено три идентичных диска из листа сплава АМГ толщиной 0,005 м, закрепленных на втулках длиной 0,066 м и диаметром 0,035 м. При необходимости проводилась статическая балансировка дисков, которая осуществлялась путем сверления торцевых отверстий с более тяжелой стороны. Неокрашенный диск показан на рис. 4.

Было проверено постоянство сохранения формы поверхности дисков по окружности на нескольких радиусах (наличие биения). В табл. 1 приведены результаты измерения биения дисков на относительных радиусах 0,40*R*, 0,70*R* и 0,95*R* в виде размахов между максимальными отклонениями. Измерения



Рис. 4. Общий вид неокрашенного диска со шлифованной поверхностью

Fig. 4. General view of non-painted disk with grinded surface

Таблица 1. Биение дисков, мм **Table 1.** Swashing of disks, mm

Расстояние от оси диска	Диск № 1	Диск № 2	Диск № 3
0,40 <i>R</i> (68 мм)	0,16	0,13	0,16
0,70 <i>R</i> (119 мм)	0,83	0,41	0,35
0,95 <i>R</i> (160 мм)	1,35	0,65	0,67



Рис. 5. Установка H39 для испытаний моделей гребных винтов в свободной воде с установленным диском

Fig. 5. H39 test rig for open-water tests of propellers, with installed disk

проводились цифровым индикатором при медленном вращении дисков. Погрешность измерения составляла не более 0,0005 м. Из таблицы видно, что диски № 2 и № 3 имеют практически одинаковое и вполне приемлемое качество изготовления. Биение диска № 1 примерно вдвое больше, чем у двух других дисков, однако, как показали измерения, это не оказало заметного влияния на точность получаемых результатов.

Испытания были проведены в глубоководном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» на экспериментальной установке НЗ9, предназначенной для испытаний моделей гребных винтов в свободной воде. Поперечные размеры бассейна (ширина – 15 м, глубина – 7 м) полностью исключают влияние дна и стенок на результаты измерений.

Экспериментальная установка H39 производства английской компании Cussons Technology Ltd обеспечивает измерение момента сопротивления до 50 Н×м. Вал приводится во вращение сервомотором мощностью 18 кВт со скоростью 30–3000 об/мин (0,5–50 об/с). Максимальное заглубление оси винтового динамометра составляет 0,920 м от поверхности воды. Динамометр с установленным диском показан на рис. 5.

При исследовании сил трения на вращающихся дисках следует помнить об очень высоких окружных скоростях, особенно вблизи наибольших радиусов. При принятом для опытов диаметре диска, равном 0,34 м, скорости на максимальном радиусе 0,17 м достигают значений 48 м/с (более 93 уз). При таких скоростях толщина ламинарного подслоя турбулентного пограничного слоя чрезвычайно мала и даже, казалось бы, небольшая шероховатость на обтекаемой поверхности может оказать заметное влияние на формирование сил трения. Поэтому при проведении опытов на каждом исследуемом виде поверхности измерялась ее шероховатость.

Шероховатость поверхности дисков измерялась цифровым профилометром марки SRG-4000 американской компании Phase II, имеющим 4 диапазона измерений. Верхний предел измерений равен ±80 мкм при длине измеряемого участка 17,5 мм. Разрешение дисплея в интересующем нас диапазоне до ±10 мкм составляет 0,001 мкм при длине измеряемого участка 1,3 мм. Прижимное усилие алмазной иглы – 4 мН. По данным фирмыпроизводителя, погрешность измерения прибора не превышает ±10 % от измеряемой фактической величины.

Подготовка к испытаниям, программа и проведение испытаний

Test preparation, program and performance

Подготовка к испытаниям

Для контроля состояния поверхности дисков в процессе опытов шероховатость измерялась как перед измерениями, так и после них. В соответствии с международной практикой проведения подобных опытов на контролируемой части поверхности измерялась высота локальных элементов шероховатости и вычислялось среднее арифметическое абсолютных значений ординат профиля шероховатости Ra. Измерения проводились с обеих сторон диска в шести секторах на расстоянии 0,7*R* от центра. Средняя шероховатость поверхности всего диска определялась как среднеарифметическое значение по измерению в 12 точках. В случае испытаний гидрофобных покрытий об их водоотталкивающих свойствах судили по поведению капли воды, размешенной на поверхности диска. На горизонтальной гидрофобной поверхности капля воды принимает округлую форму. При наклонении диска капля скатывается, не оставляя за собой мокрой дорожки из мелких капелек. Контроль постоянства гидрофобных свойств поверхности в процессе опытов также осуществлялся путем наблюдения за скатыванием капель перед измерениями и после них.

Программа и предварительные испытания

Для получения опытных данных, позволяющих решить поставленные в исследовании задачи, было решено обследовать 9 состояний поверхности, которые можно разделить на четыре группы:

- полированная, которая принята в качестве эталонной;
- неокрашенная шлифованная до покраски и неокрашенная шлифованная после удаления ранее нанесенной краски;
- три поверхности, окрашенные красками, которые рекомендованы для применения в судостроении;
- три поверхности, покрытые гидрофобными составами.

Конкретные марки красок, гидрофобных составов и измеренная шероховатость каждой из исследуемых поверхностей приведены в табл. 2. Из представленных материалов видно, что неокрашенная шлифованная поверхность металла имеет наибольшую шероховатость (2,4–2,6 мкм). При повторной шлифовке после снятия нанесенной ранее краски шероховатость уменьшилась примерно в 1,6 раза. Шероховатость поверхности после нанесения гидрофобных составов практически не изменяется, хотя просматривается тенденция к ее уменьшению. Шероховатость полированной металлической поверхности (0,3 мкм) почти на порядок меньше, чем неокрашенной шлифованной.

Таблица 2. Средняя шероховатость поверхности дисков,	мкм
Table 2. Average surface roughness of disks, µm	

Вид поверхности	Диск № 1	Диск № 2	Диск № 3
Неокрашенная шлифованная поверхность	2,617	-	2,423
Один слой цинконаполненной грунт-краски Protective Cumixan Zinc и один слой эпоксидной краски Tikkurila Temacoat RM40	2,166	1,404	2,161
Неокрашенная шлифованная поверхность после удаления ранее нанесенной краски	_	1,613	1,660
Полиэфирная краска для пластика	0,824	-	-
Неокрашенная шлифованная поверхность после удаления краски, обработанная НПТФЭ «ФОРУМ»	_	1,514	_
Полиэфирная краска для пластика, обработанная НПТФЭ «ФОРУМ»	0,810	-	-
Один слой цинконаполненной грунт-краски Protective Cumixan Zinc и один слой эпоксидной краски Tikkurila Temacoat RM40 с добавлением 30 % НПТФЭ «ФОРУМ»	_	1,369	_
Неокрашенная шлифованная поверхность после удаления краски, покрытая гидрофобным составом STOP NANO-AQ17	_	_	1,648
Неокрашенная отполированная поверхность	_	0,313	-

В опытах было предусмотрено измерение момента сопротивления на валу от силы трения на вращающихся дисках. Испытания проводились при максимальном заглублении оси вала. В этом случае высота водяного столба над поверхностью диска превышала два его диаметра и свободная поверхность не оказывала влияния на измеряемые параметры.

Первоначально были проведены ограниченные по объему наладочные, пробные испытания. Обороты вала задавались в диапазоне от 5 до 45 об/с с шагом 5 об/с. При оборотах 5 об/с величина измеряемого момента сопротивления равнялась всего 0,5 H×м, что составляло примерно 1,0% от верхнего предела линамометра, поэтому при измерениях наблюдались недопустимо большие случайные погрешности, намного (в разы) превышавшие объективное различие в коэффициентах моментов сопротивления сопоставительных измерений, полученных на высоких оборотах. Кроме того, при скорости вращения 5 об/с около 37 % площади диска вблизи оси вала обтекается ламинарным потоком, при 10 об/с эта плошаль сокращается до 17%. При числах оборотов, равных или больше 15 ($Rn > 2 \times 10^6$), практически на всей площади диска течение турбулентное. Поэтому при анализе закономерностей изменения коэффициентов крутяших моментов в зависимости от числа Рейнольдса были использованы результаты измерений только в диапазоне 15-45 об/с. На диске с полированной поверхностью, который испытывался при более низкой температуре воды в бассейне, момент сопротивления дополнительно измерен при 47,5 об/с. В опытах не предпринималось никаких мер для искусственной турбулизации течения на малых радиусах. Время осреднения для каждого измерения было выбрано 40 с. Для всех вариантов поверхности проводилось три повторяющихся цикла измерений от меньших оборотов к большим. Диапазону 15-45 об/с соответствуют числа Рейнольдса $(2,6-8,2) \times 10^{6}$. На относительном радиусе диска 0,7Rэтим оборотам соответствуют линейные скорости V = 7,5-33,6 m/c.

Результаты силовых измерений для дальнейшего анализа были обработаны в виде безразмерной зависимости коэффициента момента сопротивления C_M диска, смоченного с двух сторон, от числа Рейнольдса $C_M = f(Rn)$ по формуле

$$C_M = 2M/(\rho \omega^2 R^5)/(1+1.94t/R), \tag{4}$$

где M — момент сопротивления вращению диска, Н×м; ρ — плотность жидкости, кг/м³; ω — угловая скорость, рад/с; R — радиус диска, м; t — толщина диска, м. Поправка на толщину диска *t* в формуле (4) была введена для корректного сравнения результатов измерений с теоретическими значениями, вычисленными по классическим формулам 30-х гг. прошлого века [27]. Характерное число Рейнольдса определялось по максимальному радиусу диска: $Rn = \omega R^2/v = 2\pi n R^2/v$. Значение коэффициента кинематической вязкости *v* в зависимости от температуры принималось по рекомендациям [30].

Поскольку в эксперименте обороты вала неизбежно получались с некоторым отклонением от заданных, для каждого цикла измерений строились зависимости $C_M(n)$, по которым определялись величины C_M для точных значений оборотов. При этом экспериментальные точки аппроксимировались кубическим сплайном. Затем для каждого точного значения оборотов вычислялось среднее значение C_M как среднее арифметическое из трех значений.

Особенности исследуемых гидрофобных покрытий

Peculiarities of hydrophobic coatings under investigation

В работе исследовано два вида гидрофобных покрытий. Первое разработано на основе нанодисперсного политетрафторэтилена (НПТФЭ) «ФОРУМ» Институтом химии Дальневосточного отделения Российской академии наук (г. Владивосток) [29]. НПТФЭ «ФОРУМ» представляет собой низкомолекулярный порошок из микрочастиц сферической формы размером около 1 мкм, морфологически состоящих из пакета нанопленок. Благодаря наноэффекту нанопленки легко налипают на любую поверхность, включая высокодисперсные материалы, что способствует легкости применения этого вещества в любых композиционных материалах, включая лакокрасочные покрытия. Краевой угол смачивания НПТФЭ «ФОРУМ» составляет 118-122° в зависимости от материала, на который наносится покрытие. Электронные фотографии НПТФЭ «ФОРУМ» в виде микротрубок длиной до 150 мкм и нанопорошка, состоящего из нанопленок в виде микросфер диаметром около 1 мкм, приведены на рис. 6.

НПТФЭ «ФОРУМ» исследовался в двух вариантах: в виде порошка и в виде суспензии, которая использовалась в составе лакокрасочной композиции как присадка к краске. Сухой порошок НПТФЭ при небольшом механическом усилии наносился на поверхность методом натирания хлопчатобумажной тканью, при этом частицы порошка легко рас-



Рис. 6. Электронные микрофотографии НПТФЭ:

a) микротрубки; б) микропорошок; в) микрочастица (совокупность этих частиц образует микропорошок)

Fig. 6. Electronic photos of NPTFE:

a) microtubes; b) micropowder; c) microparticles forming the micropowder

падаются на нанопленки, которые прочно прикрепляются к поверхности, образуя водоотталкивающую пленку толщиной 1-2 мкм. Чтобы получить суспензию в краске, порошок в специальном кавитаторе-диспергаторе путем диспергирования вводится в тот тип растворителя, который затем используется для разведения краски. Перед применением полученная суспензия диспергируется в лакокрасочное покрытие в необходимом соотношении.

Порошок НПТФЭ «ФОРУМ» был нанесен на поверхность диска № 1, покрытую полиэфирной краской, и на неокрашенную поверхность диска № 2, полученную после удаления эпоксидной краски. Суспензия НПТФЭ «ФОРУМ» использовалась в качестве 30 % присадки к эпоксидной краске Tikkurila Тетасоаt RM40, которой был покрыт диск № 2.

На рис. 7 показаны капли воды на поверхности диска № 1 с гидрофобным покрытием НПТФЭ «ФОРУМ», нанесенным на окрашенную поверхность методом натирания.

Второе исследуемое покрытие STOP NANO-AQ17 было предоставлено ООО «Дон-Нано» (г. Ростов-на-Дону), которое является официальным дистрибьютором американской компании Ultra Guard – «Мирового флагмана в области производства и разработки революционных супергидрофобных и олеофобных материалов», как они себя позиционируют на рынке.

Нанесенный состав после поляризации представляет собой вертикальные нано-иглы с краевым углом смачивания 130°. Состав может наноситься аппликатором или пульверизатором без грунтовочного слоя практически на все поверхности (кроме некоторых видов пластика). На отлип высыхает в течении 3-4 часов, полная поляризация состава наступает в течение семи дней. Эксплуатация обработанного составом предмета допускается спустя 24 часа. Покрытие STOP NANO-AQ17 было нанесено на неокрашенную поверхность диска № 3.

На рис. 8 показаны капли воды на поверхности диска № 3 с гидрофобным покрытием STOP NANO-AQ17, нанесенным на неокрашенную шлифованную поверхность алюминиевого диска.

Все опыты проведены в относительно короткий период времени – в течение двух недель. Наблюдаемая температура воды незначительно изменялась от опыта к опыту. Эти изменения зафиксированы и учтены при обработке результатов опытов. В опытах не определялась плотность распределения элементов шероховатости на единице площади на разных видах поверхностей.





Fig. 7. Water drops on the surface of disk with Forum hydrophobic NPTFE coating



Рис. 8. Капли воды на поверхности диска с гидрофобным покрытием STOP NANO-AQ17 **Fig. 8.** Water drops on the surface of disk

with STOP NANO-AQ17 hydrophobic coating

С тем чтобы было удобнее выявлять физические особенности изменения сопротивления трения дисков в зависимости от состояния их поверхностей, при анализе результаты испытаний подразделялись по типам поверхностей (неокрашенные или окрашенные), по группам испытаний на каждом диске и по видам сопоставляемых поверхностей с различными покрытиями.

Результаты испытаний металлических дисков со шлифованной и полированной поверхностями

Test results for metal disks with grinded and polished surfaces

Исходные состояния поверхности дисков менялись от опыта к опыту. Сначала испытывались новые



шлифованные диски № 1 и № 3 (до покрытия красками или гидрофобными составами). Диски № 2 и № 3 испытывались также с неокрашенной шлифованной металлической поверхностью, но после удаления ранее нанесенных краски и грунта. После завершения основного цикла испытаний диск № 2 был отполирован и вновь испытан. Шероховатость всех обследованных образцов поверхности очень различалась (табл. 2).

На рис. 9 представлены результаты измерений коэффициентов момента сопротивления на дисках с неокрашенной шлифованной поверхностью, как на исходной неокрашенной поверхности, так и на поверхности после удаления нанесенной краски. Видно, что увеличение коэффициентов моментов от сил трения коррелируется с увеличением высоты элементов шероховатости. Коэффициенты моментов дисков со шлифованной поверхностью с ростом высоты элементов шероховатости на поверхности при увеличении числа Рейнольдса повышаются вследствие влияния шероховатости на течение в ламинарном подслое. Характер изменения коэффициента момента на диске с полированной поверхностью позволяет считать эту поверхность гидродинамически гладкой.

Для ориентировочных оценок площадей поверхности дисков, на которых шероховатость на поверхности могла оказывать или не оказывать влияние на течение в пограничном слое, авторы статьи воспользовались результатами наблюдений, приведенными в работах [32, 34]. Предварительно были выполнены расчетные оценки изменения толщины ламинарного подслоя вдоль радиуса, с которыми сопоставлены высоты элементов шероховатости на поверхности. Толщина ламинарного подслоя δ_{n} рассчитывалась на шести радиусах: r = 0,050; 0,075; 0,100; 0,125; 0,150

Рис. 9. График зависимости коэффициента момента сопротивления *С_м* от числа Рейнольдса Rn для дисков с неокрашенной поверхностью

Fig. 9. Resistance moment coefficient C_M versus Reynolds number Rn for non-painted disks

Неокрашенная шлифованная поверхность: \Box диск № 1, Ra = 2,617 мкм Δ лиск № 3, Ra = 2.423 мкм

Неокрашенная шлифованная поверхность после удаления краски:

- О диск № 3, *Ra* = 1,660 мкм

Неокрашенная полированная поверхность:

■ диск № 2, *Ra* = 0,313 мкм

и 0,170 м. – которым соответствовали относительные радиусы r/R = 0.294; 0.441; 0.588; 0735; 0.882; 1.0. Расчеты выполнены для условия гидродинамически гладкой поверхности в следующей последовательности. Сначала определялась окружная скорость U(r) = $2\pi nr$, затем число Рейнольдса Rn = Ur/v и его логарифм – logRn. По формуле Прандтля – Шлихтинга рассчитывался коэффициент касательного напряжения $C_f = 0.455/(\log Rn)^{2.58}$, далее – касательное напряжение $\tau_w = C_f \times \rho(U^2)/2$ и динамическая скорость $u_{\tau} = (\tau_w / \rho)^{1/2}$. Толщина ламинарного подслоя определена по формуле $\delta_{\pi} = 5 \times \nu \times (1/u_{\tau})$ м. На рис. 10 показаны отношения величин высоты шероховатости поверхности к местной толшине ламинарного подслоя в зависимости от радиуса для трех значений оборотов в секунду: 15 – минимальные, 30 – в середине исслелуемого лиапазона и 45 – максимальные в опытах.

Если в качестве критерия гидродинамической гладкости принять за ориентир отношение высоты шероховатости к толщине ламинарного подслоя менее 0,16 (наибольшего, по данным [32, 34]), то, действительно, в условиях проводимых опытов гидродинамически гладким оказался только диск с полированной поверхностью. На всех других поверхностях дисков относительная шероховатость, резко увеличивающаяся в направлении роста ралиуса лиска, должна оказывать влияние на течение в пограничном слое диска на преобладающей части его поверхности (рис. 10). Как видно, на неокрашенных дисках шероховатость является основным фактором, определяющим изменение сопротивления трения поверхности диска. Коэффициенты моментов с близкими высотами элементов шероховатости (1,66 и 1,61 мкм), определенными на физически разных дисках № 2 и № 3, совпадают до чисел Рейнольдса, равных примерно 4,5×10⁶ (до 25 об/с). При больших оборотах (от 30 до 45) на диске № 2 при меньшей высоте элементов шероховатости коэффициент момента несколько выше (на 1,4 %). Это указывает на то, что на результаты измерения оказывают влияние какие-то не контролируемые в опытах факторы, например особенности профилей шероховатости и идентичность их на всей поверхности дисков. Отсюда следует вывод, что корректно сопоставлять силы трения можно только на конкретных парах сравниваемых покрытий на физически одном и том же диске: исходное покрытие - новое покрытие поверх исходного. При сопоставлениях следует учитывать как изменение высоты элементов шероховатости на поверхности, так и возможное изменение участков поверхности, на которых шероховатость оказывает влияние на течение в ламинарном подслое.



Рис. 10. Отношение величины высоты шероховатости поверхности к местной толщине ламинарного подслоя в зависимости от радиуса. Пунктирная линия – $Ra/\delta = 0,16$: a) n = 15 об/с; 6) n = 30 об/с; в) n = 45 об/с

Fig. 10. Surface roughness height versus local thickness of laminary sublayer at different radii. Dashed curve Ra/δ = 0.16

a) n = 15 r/s; b) n = 30 r/s; c) n = 45 r/s

Результаты испытаний окрашенных дисков и дисков с гидрофобными покрытиями

Test results for painted disks and for disks with hydrophobic coatings

Испытания проводились с использованием всех трех дисков. Диски № 1, № 2 и № 3 были окрашены краской для защиты подводной части корпуса стальных судов. Она представляла собой двуслойное покрытие: первый слой – цинконаполненная грунт-краска Protective Cumixan Zinc, используемая для лучшей адгезии, второй слой – эпоксидная краска Tikkurila Temacoat RM40. Средняя шероховатость поверхности дисков с этой краской указана в табл. 2. Шероховатость поверхности окрашенных дисков уменьшилась по сравнению с неокрашенной поверхностью (табл. 2).

На рис. 11 показаны результаты испытаний дисков, покрытых грунтом и краской Tikkurila Temacoat RM40, в виде зависимости $C_M = f(Rn)$. Как видно из приведенных графиков, меньший коэффициент момента сопротивления соответствует меньшей шероховатости поверхности. Вместе с тем, как



и в предыдущем случае (рис. 10), при формально меньшей высоте элементов шероховатости на диске № 3, коэффициенты момента сопротивления на нем оказались несколько больше, чем на диске № 1: различие в величинах этих коэффициентов составляет не выше 1,5%. Отметим, что в процессе опытов, к сожалению, по техническим причинам, не контролировалось состояние (шероховатость) торцевой части поверхности дисков, ширина которых t составляет 0,005 м. Относительная площадь торцевой части диска равна $\Delta S = 2\pi R \times t/2\pi R^2 = t/R =$ = 0,0294, т.е. почти 3 %. Не исключено, что указанный фактор мог приводить к отмеченным небольшим аномалиям в закономерностях изменения коэффициентов моментов сопротивления при очень близких величинах высот элементов шероховатости как в сторону увеличения коэффициентов момента, так и в сторону их уменьшения.

Поскольку водоотталкивающие покрытия можно применять не только на судах, изготовленных из стали или алюминия, диск № 1 дополнительно был испытан с покрытием полиэфирной краской, предназначенной для катеров и лодок, изготовленных из пластика.

Рис. 11. График зависимости коэффициента момента сопротивления C_M от числа Рейнольдса Rn для трех дисков, покрытых грунтом и краской Tikkurila Temacoat RM40

Fig. 11. Resistance moment coefficient C_M versus Reynolds number Rn for three disks coated with primer and Tikkurila Temacoat RM40 paint

Окрашенная поверхность:

- □ диск № 1, *Ra* = 2,166 мкм
- О диск № 2, *Ra* = 1,404 мкм
- ∆ диск № 3, *Ra* = 2,161 мкм

Неокрашенная полированная поверхность:

■ диск № 2, *Ra* = 0,313 мкм

Рис. 12. График зависимости коэффициента момента сопротивления *С*^{*м*} от числа Рейнольдса Rn для диска № 1

Fig. 12. Resistance moment coefficient C_M versus Reynolds number Rn for Disk 1

Диск № 1:

- △ полиэфирная краска для пластика, *Ra* = 0,824 мкм
- ♦ полиэфирная краска для пластика, покрытая

НПТФЭ ФОРУМ^{ТМ}, Ra = 0,810 мкм

Диск № 2:

■ полированная поверхность, *Ra* = 0,313 мкм

 \mathcal{A}_{∇}

 $C_{M} \cdot 10^{3}$

8

Рис. 13. График зависимости коэффициента момента сопротивления *С*_м от числа Рейнольдса Rn для диска № 2

Fig. 13. Resistance moment coefficient C_M versus Reynolds number Rn for Disk 2

- ∇ Эпоксидная краска, Ra = 1,404 мкм △ Эпоксидная краска с добавлением
- 30% НПТФЭ ФОРУМ^{ТМ}, *Ra* = 1,369 мкм ■ Неокрашенная полированная поверхность,
- *Ra* = 0,313 мкм

Рис. 14. График зависимости коэффициента момента сопротивления *С*_м от числа Рейнольдса Rn для диска №3

Fig. 14. Resistance moment coefficient C_M versus Reynolds number Rn for Disk 3

Диск № 3:

- ♦ неокрашенная шлифованная поверхность с покрытием "STOP NANO-AQ17", *Ra* = 1,648 мкм

Диск № 2:

неокрашенная полированная поверхность, *Ra* = 0,313 мкм

Результаты испытаний дисков с водоотталкивающими покрытиями приведены на рис. 12–14 в виде зависимости $C_M = f(\text{Rn})$. Здесь же для сравнения даны результаты испытаний дисков с контрольными поверхностями. Также на рисунках указана средняя шероховатость поверхности испытанных дисков, измеренная цифровым профилометром.

Как видно из приведенных графиков, результаты испытаний с обычными и гидрофобными покрытиями во всех случаях при одинаковых числах Рейнольдса Rn = $2\pi n R^2 / v$ практически совпали (рис. 12-14), т.е. особенные свойства гидрофобных покрытий не привели к изменению сил трения. Определяющее значение имела шероховатость поверхности, которая зависит от физических свойств используемой краски и степени чистоты обработки поверхности. В этом нетрудно убедиться, рассматривая картину изменения коэффициента момента сопротивления в зависимости от высоты элементов шероховатости на всех обследованных покрытиях при фиксированных значениях чисел оборотов (чисел Рейнольдса) (рис. 15). Каждой конкретной величине элементов шероховатости соответствует только одно значение коэффициента момента сопротивления. Во всех опытах и на всех



режимах коэффициенты момента сопротивления были больше, чем на диске с полированной поверхностью.



Рис. 15. График зависимости коэффициента момента сопротивления *С*_м испытанных дисков от высоты элементов шероховатости поверхности *Ra* при фиксированных значениях оборотов за секунду – 20, 30 и 45

Fig. 15.Resistance moment coefficient C_M of tested disks versus height of surface roughness elements, R_a , at fixed rotation speeds: 20, 30 and 45 rps

Оценки достоверности результатов выполненных исследований

Test data reliability assessment

Исследования изменения моментов сопротивления вращающихся дисков с гидродинамически гладкой поверхностью в зависимости от числа Рейнольдса можно отнести к одной из классических задач гидродинамики, многие годы привлекавших как теоретиков, так и экспериментаторов. Обследованный диапазон чисел Рейнольдса изменяется от 5×10^4 до 7×10^6 (рис. 1) [27]. Он охватывает области ламинарного, переходного и турбулентного течения. Результаты исследований гладкого (полированного)



Рис. 16. Сопоставление результатов измерения коэффициента момента сопротивления полированного диска с теоретическими решениями и эмпирическими зависимостями

Fig. 16. Test data for resistance moment coefficient of polished disk versus theoretical solutions and empirical relationships

 Формула	Голд	стейна

- --- Формула Дорфмана
- Формула Каневского
- — Формула Кармана
 - Эксперимент: NACA Report No/793 [27]
 - Диск № 2: неокрашенная полированная поверхность, *Ra* = 0,313 мкм

диска, полученные в настоящей работе, полностью согласуются с каноническими результатами, представленными на рис. 1, что позволяет судить об их качестве. На рис. 16 сопоставлены результаты измерения коэффициентов моментов сопротивления на полированном диске с известными результатами опытов NACA [27], теоретическими решениями и с эмпирическими зависимостями, полученными при обработке результатов опытов, в соответствии с формулами:

Т. Кармана [27]

$$C_M = 0.146 \mathrm{Rn}^{-1/5};$$
 (5)

С. Голдстейна [27]

$$\frac{1}{\sqrt{C_M}} = 1,97 \, \lg(\mathrm{Rn}\sqrt{C_M}) + 0,03; \tag{6}$$

Г.И. Каневского

$$C_M = \frac{0.951}{(\ln \mathrm{Rn})^{2.58}};\tag{7}$$

Л.А. Дорфмана [35]

$$C_M = \frac{0.982}{(\ln \mathrm{Rn})^{2.58}}.$$
(8)

Как уже отмечалось, течение на поверхности исследуемых дисков становится полностью турбулентным при числах оборотов, равных или больших 15. Полученные в работе результаты измерений в диапазоне 15–45 об/с находятся практически в середине поля результатов расчетов по формулам (5)–(8) и полностью согласуются с каноническими результатами, представленными на рис. 1 [27]. Это позволяет считать полированную поверхность, исследованную в условиях опытов в настоящей работе, гидродинамически гладкой, а материалы, полученные в рассматриваемых опытах, достоверными.

На испытанных дисках толщина пограничного слоя и толщина ламинарного подслоя очень малы. Толщина пограничного слоя может быть оценена по формуле Т. Кармана [27]:

$$\delta = 0,526r \left(\frac{v}{r^2 \omega}\right)^{1/5}.$$
(9)

На расстоянии 0,7R от оси диска в диапазоне 15–45 об/с она уменьшается с 4 до 3 мм. Толщина ламинарного подслоя на этом же радиусе изменяется от 7 до 5 мкм.

Заключение

Conclusion

Подводя итоги выполненного исследования, можно сделать следующие выводы.

В граничных физических условиях выполненных опытов (размеры дисков, диапазон чисел оборотов) только полированная поверхность дисков (с высотой элементов шероховатости 0,3 мкм) обеспечила условия гидродинамической гладкости, т.е. отсутствие влияния указанной шероховатости на течение в пограничном слое во всем диапазоне обследованных оборотов. Результаты измерений моментов сопротивления диска с полированной поверхностью практически совпали с результатами образцовых исследований, выполненных ранее в Германии, США и СССР.

Вследствие чрезвычайной тонкости турбулентного слоя и его ламинарного подслоя на поверхности вращающегося диска влияние шероховатости на турбулентное течение и сопротивление трения стало заметным и зафиксировано измерительным оборудованием при высоте элемента шероховатости 0,8 мкм. Диаметр микрочастицы микропорошка обследованного покрытия политетрафторэтилена составляет около 1 мкм. поэтому по сравнению с гидродинамически гладкой поверхностью такое покрытие приводит к росту сопротивления трения. Если исходная шероховатость покрытия будет заметно больше 1 мкм, то микропорошок может выровнять поверхность и сопротивление трения станет меньше. Но снижение сопротивления трения будет обусловлено не свойством гидрофобности покрытия, а уменьшением высоты элементов шероховатости на поверхности.

Все результаты измерений, полученные в представленной работе, показали, что степень увеличения сопротивления трения поверхностей с разными видами покрытий на поверхности дисков при фиксированных значениях числа Рейнольдса связана исключительно с ростом высоты элементов шероховатости на них.

Физическое свойство гидрофобности материала не приводит к уменьшению сопротивления трения при турбулентном течении в пограничном слое. Результаты исследований влияния микрошероховатости на сопротивление трения на обычных и гидрофобных покрытиях, полученные в представленной работе, находятся в соответствии с результатами, полученными ранее в [32, 34]. В смысле физики явления они свидетельствуют о том, что и на гидрофобных покрытиях жидкость прилипает

к обтекаемой поверхности. Таким образом, использование гидрофобных покрытий в качестве средства для снижения сопротивления трения корпуса судна и объектов морской техники нецелесообразно.

Библиографический список

References

- Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces // Planta. 1997. 202(1). P. 1–8.
- Quere D., Reyssat M. Non-adhesive lotus and other hydrophobic materials // Philos. Trans. Roy. Soc. 2008. A 366, 1539.
- Hahn S., Je J., Choi H. Direct numerical simulation of turbulent channel flow with permeable walls // Journal of Fluid Mechanics. 2002. Vol. 450. P. 259–285.
- Min T., Kim J. Effects of hydrophobic surface on skinfriction drag // Physics of Fluids. 2004. Vol. 16. № 7. P. L55–L58.
- Fukagata K., Kasagi N., Koumoutsakos P. A theoretical prediction of friction drag reduction in turbulent flow by superhydrophobic surfaces // Physics of Fluids. 2006. Vol. 18. P. 051703:1–051703:4.
- Martell M.B., Perot J.B., Rothstein J.P. Direct numerical simulations of turbulent flows over superhydrophobic surfaces // Journal of Fluid Mechanics. 2009. Vol. 620. P. 31–41.
- Martell M.B., Rothstein J.P., Perot J.B. An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation // Physics of Fluids. 2010. Vol. 22.
- Amirreza R., Rayhaneh A. Lattice Boltzmann simulations of drag reduction by super-hydrophobic surfaces // 14th European Turbulence Conference. 1–4 September, 2013, Lyon, France.
- Watanabe K., Yanuar H., Udagawa H. Drag reduction of Newtonian fluid in a circular pipe with highly waterrepellant wall // Journal of Fluid Mechanics. 1999. Vol. 381.
- Gordon T.D., McCarthy T.J. Drag-reduction and slip: an investigation of size scale and hydrophobicity effects // Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division. 2000. P. 367–374.
- Balasubramanian A.K., Miller A.C., Rediniotis O.K. Microstructured hydrophobic skin for hydrodynamic drag reduction // AIAA J. 2000. 42(2). P. 411–413.
- 12. *Tretheway D.C., Meinhart C.D.* Apparent fluid slip at hydrophobic microchannel walls // Physics of Fluids. 2002. Vol. 14.
- 13. *Ou J.*, *Perot J.B.*, *Rothstein J.P.* Laminar drag reduction in microchannels using superhydrophobic

surfaces // Physics of Fluids. 2004. Vol. 16. P. 4635–4643.

- Zhao J., Du X., Shi X. Experimental research on frictionreduction with superhydrophobic surfaces // J. Marine Science and Application. 2008. 6(3). P. 58–61.
- Davies J., Maynes D., Webb B.W., Woolford B. Laminar flow in a microchannel with superhydrophobic walls exhibiting transverse ribs // Physics of Fluids. 2006. Vol. 18. P. 087110:1–087110:11.
- Henoch C., Krupenkin T.N., Kolodner P., Taylor J.A., Hodes M.S., Lyons A.M., Peguero C., Breuer K. Turbulent drag reduction using superhydrophobic surfaces // 3rd AIAA Flow Control Conference. 5–8 June 2006, San Francisco, California.
- 17. Daniello R.J., Waterhouse N.E., Rothstein J.P. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces // Physics of Fluids. 2009. Vol. 21.
- Levine M. Hydrophobic materials and their effects on drag reduction. URL: anyflip.com/gkud/evza/basic (дата обращения: 25.01.2018).
- Greidanus A.J., Delfos R., Westerweel J. Drag reduction by surface treatment in turbulent Taylor-Couette flow // 13th European Turbulence Conference (ETC13). Journal of Physics: Conference Series 318. 2011.
- Vakarelski I.U., Chan D.Y., Thoroddsen S.T. Leidenfrost vapor layer moderation of the drag crisis and trajectories of superhydrophobic and hydrophilic spheres falling in water // Soft Matter. 2014. 10(31):5662-8.
- Srinivasan S., Kleingartner J.A., Gilbert J.B., Cohen R.E., Milne A.J.B., McKinley G.H. Sustainable drag reduction in turbulent Taylor-Couette flows by depositing sprayable superhydrophobic surfaces // Physical Review Letters. 2015. 114(1):014501.
- 22. Пустошный А.В., Хомяков А.А., Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Супергидрофобные покрытия. Возможности и перспективы их применения для снижения гидродинамического сопротивления // Международная конференция по судостроению и океанотехнике (NAOE 2016). 6–8 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия. [А. Pustoshny, A. Khomyakov, L. Boynovich, A. Yemelyanenko. Superhydrophobic coatings. Capabilities and prospects of their application for hydrodynamic resistance mitigation // International conference on Naval Architecture and Ocean Engineering (NAOE 2016). June 6–8, 2016. St. Petersburg, Russia. (in Russian)].
- Boinovich L., Emelyanenko A. Principles of design of superhydrophobic coatings by the deposition from dispersions. Langmuir. 2009. Vol. 25. № 5. P. 2907–2912.
- Mishchenko L., Hatton B., Bahadur V., Taylor J.A., Krupenkin T., Aizenberg J. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets // Nanoletters. 2010. 4(12). P. 7699–7707.

- Wang S., Jiang L. Definition of superhydrophobic states // Advanced Materials. 2007. 19(21). P. 3423–3424.
- 26. Комплект Ultra-ever dry // Ultra guard. URL: http://ultra-ever-dry.info/katalog/komplekt_ultraever_dry/ (дата обращения: 25.01.2018). [Set Ultraever dry // Ultra guard. URL: http://ultra-everdry.info/katalog/komplekt_ultra-ever_dry/ (date of circulation: January 25, 2013).]
- Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1969. [*H. Schlichting*. Boundary Layer Theory. Moscow: Nauka, 1969. (in Russian)].
- 28. Мирошник Д.Ю., Сверчков А.В. Оценка возможности применения гидрофобных покрытий для снижения гидродинамического сопротивления судов // Международная конференция по судостроению и океанотехнике (NAOE 2016). 6–8 июня 2016, Санкт-Петербург, Россия. [D. Miroshnik, A. Sverchkov. Assessing the possibility of applying hydrophobic coatings to reduce hydrodynamic resistance of ships // International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering (NAOE2016). June 6–8, 2016. Saint-Petersburg, Russia. (in Russian)].
- 29. Цветников А.К., Матвеенко Л.А., Пузь А.В., Егоркин В.С., Голуб А.В., Масленников С.И., Павлов А.Д., Гнеденков С.В. Нанодисперсный политетрафторэтилен ФОРУМ^{ТМ} и его влияние на физические свойства лакокрасочных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. 2016. № 1–2. С. 63–67. [A. Tsvetnikov, L. Matveenko, A. Puz, V. Yegorkin, A. Golub, S. Maslennikov, A. Pavlov, S. Gnedenkov. Nano-disperse polytetrafluorethylene ForumTM and its effect upon physical properties of paint coatings // Lakokrasochnie Materialy i Ikh Primenenie (Russian Coatings Journal). 2016; 1–2: 63–7. (in Russian)].
- ITTC Recommended procedures. Testing and extrapolation methods, General. Fresh water and seawater properties, 7.5-02-01-03, Effective Date 2011. Revision 02.
- Aljallis E., Sikka V.K., Jones A.K., Sarshar M.A., Datla R., Choi C.H. Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds number boundary layer flow // Physics of Fluids. 2013. Vol. 25(2).
- Bidkar R.A., Leblanc L., Kulkarni A.J., Bahadur V., Ceccio S.L., Perlin M. Skin-friction drag reduction in the turbulent regime using random-textured hydrophobic surfaces // Physics of Fluids. 2014. Vol. 26(8).
- 33. *Hokmabad B.V.*, *Ghaemi S.* Turbulent flow over wetted and non-wetted superhydrophobic counterparts with random structure // Physics of Fluids. 2016. Vol. 28(1).
- 34. Gose J.W., Golovin K., Barros J., Schultz M., Tuteja A., Ceccio S.L., Perlin M. Biomimetic super-hydrophobic

coatings for friction reduction // 10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles (HIPER'16). 17–19 October, 2016, Cortona, Italy. P. 477–490.

35. Дорфман Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплопередача вращающихся тел. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. [L. Dorfman. Hydrodynamic resistance and heat transfer of rotating bodies. Moscow: State Publishing House of Physical & Mathematical Literature (Fizmatlit), 1960. (in Russian)].

Сведения об авторах

Орлов Олег Павлович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Мос-

ковское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 415-45-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Сверчков Андрей Владимирович, к.т.н., с.н.с., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Телефон: 8 (812) 748-63-26. Е-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Orlov, Oleg P., D. Sc., Professor, Principal research Scientist, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 415-45-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Sverchkov, Andrei V., Cand. Sc. (Tech), Senior Research Scientist, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: Moskovskoe shosse 44, St. Petersburg, 196158, Russia. Tel.: 8 (812) 748-63-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 12.02.18 Принята в печать / Ассерted: 05.03.18 © Орлов О.П., Сверчков А.В., 2018