



ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.015.2
EDN: AOQSWX

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОДВОДА ПУЗЫРЬКОВ ВОЗДУХА К КОРПУСУ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

Объект и цель научной работы. На базе опубликованных данных и опыта специалистов Крыловского центра по использованию воздуха для снижения сопротивления воды движению судна проанализированы перспективы применения технологии воздушной смазки, связанной с подводом пузырьков воздуха к корпусу. Анализ проводился с целью выявления возможных и перспективных направлений снижения сопротивления для внедрения на транспортные суда без изменения их обводов. Настоящая работа является первой из двух статей, посвященных рассмотрению аспектов применения воздушной смазки на эксплуатирующихся судах в связи с внедрением новых директив Международной морской организации (далее – ИМО, от англ. International Maritime Organization) по энергоэффективности. Технология воздушной смазки формированием частичных каверн будет рассмотрена в отдельной статье.

Материалы и методы. Работа выполнена как аналитический обзор исследований по теме. Приведены также теоретические оценки для отдельных аспектов применения технологии подводом воздуха.

Основные результаты. Технология воздушной смазки подводом пузырьков воздуха к корпусу выглядит привлекательной для эксплуатирующихся судов, т.к. ее внедрение не требует значительной модификации судна и минимизирует затраты на модернизацию. В лабораторных условиях на небольших моделях и в схематизированных течениях регистрировались значительные эффекты снижения сопротивления (десятки процентов). В единичных прецедентах натурального применения такой технологии удалось достичь эффекта снижения сопротивления порядка 5–7 %, однако в ряде случаев натурные испытания не выявили даже минимального эффекта улучшения энергоэффективности. На данный момент нет однозначного понимания механизма снижения сопротивления подводом пузырьков, к тому же организация данного подвода связана с технологическими сложностями.

Заключение. Проведенный анализ показал, что технология воздушной смазки подводом пузырьков к корпусу интересна с точки зрения минимальных затрат на ее организацию при ожидаемом эффекте снижения сопротивления порядка 5–7 %. В то же время применение технологии несет значительные риски в части достижимого эффекта. Представляется перспективной организация воздушной смазки совместно с применением супергидрофобных покрытий, которые могут значительно улучшить устойчивость воздушного слоя и снизить потребный расход воздуха, однако вопрос совместного применения технологий нуждается в дополнительных исследованиях.

Ключевые слова: снижение сопротивления судна, подвод воздуха, воздушные пузырьки.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

NAVAL ARCHITECTURE

UDC 629.5.015.2
EDN: AOQSWX

A.V. Pustoshny , A.V. Sverchkov 
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

BUBBLE LUBRICATION OF HULL FOR POWER EFFICIENCY IMPROVEMENT OF SHIPS

Для цитирования: Пустошный А.В., Сверчков А.В. Использование подвода пузырьков воздуха к корпусу для улучшения энергоэффективности судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 1(415): 17–36.

For citations: Pustoshny A.V., Sverchkov A.V. Bubble lubrication of hull for power efficiency improvement of ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 1(415): 17–36 (in Russian).

Object and purpose of research. This paper analyses available publications and accumulated experience of Krylov State Research Centre experts with respect to air-based solutions for drag reduction of ships to estimate the prospects of air lubrication technology when hull drag is reduced by means of air bubble flow. The purpose of the analysis was to identify possible and viable solutions for drag reduction of cargo ships without alteration of their hull lines. This paper is the first article in the series of two publications dealing with various aspects of air lubrication experience for in-service ships in view of newly adopted directives of International Maritime Organization (IMO) with respect to power efficiency. A particular case of air lubrication technique (formation of partial air cavities) will be discussed in a separate article.

Materials and methods. This paper is an analytical review of available publications on the subject matter. It also presents theoretical estimates for certain application aspects of air lubrication technology.

Main results. Air lubrication technology in its bubble-based variation seems an attractive solution for in-service ships because it can be readily implemented without any serious modifications of hull, so retrofitting costs will be minimized. In laboratory conditions (small-scale models and schematic currents), achievable hull drag was as high as dozens of percents. In the real world, however, this effect was only 5–7 %, and that for rare examples. Moreover, in some cases the trials of full-scale ships have not shown even the slightest growth in power efficiency. Currently, there is no clear understanding on how exactly bubble flow contributes to drag reduction. Besides, technical implementation of bubble-lubrication system poses a number of difficulties.

Conclusion. The analysis has shown that bubble-lubrication technology is attractive because it may offer 5–7 % of gain in hull drag virtually at no cost at all. At the same time, actually achieved effect varies widely, which makes bubble lubrication a risky solution. It would be practicable to apply air lubrication jointly with super-hydrophobic coatings that may considerably improve the stability of air layer and reduce air demand. Currently, however, this option is not investigated well enough.

Keywords: hull drag, air supply, air bubbles.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Внедренное ИМО жесткое регулирование эмиссии судами углекислого газа (CO₂) стимулирует поиск средств улучшения характеристик энергоэффективности судов. Согласно стратегии, принятой в 2023 г., цель ИМО – достижение полного обнуления эмиссии CO₂ от судоходства к 2050 г. На первом этапе регулирования эмиссии CO₂ акцент делался на внедрении энергосберегающих устройств (далее – ЭУ), улучшающих условия работы гребного винта, к которым относят различные преднасадки и крыльцевые системы – вихрегенераторы. ЭУ утилизируют потери энергии при обтекании корпуса и гребного винта. Эффективность каждого ЭУ составляет порядка 5 %, и их эффекты далеко не всегда суммируются. Поэтому применение таких ЭУ недостаточно для полной декарбонизации судоходства, и для достижения поставленной ИМО цели необходим переход на новую энергетику.

Однако в 2023 г. ИМО были введены новые контрольные параметры энергоэффективности и разработан механизм их ежегодного ужесточения. Для соответствия этим параметрам теперь требуется постоянное снижение объема годовой эмиссии от каждого судна, находящегося в эксплуатации [1]. Эти нововведения сделали вновь актуальными меры, обеспечивающие хотя бы небольшое (3–5 %) улучшение энергоэффективности при минимальном (в интересах судовладельцев) объеме модернизации

судов. Необходимость такой модернизации для удовлетворения директивам ИМО теперь будет возникать каждые 3–6 лет.

Наряду с новыми перспективами применения ЭУ [2] такая постановка задачи для эксплуатирующихся судов придала новый импульс интереса к другим средствам энергосбережения, способным улучшать энергоэффективность судов на 3–5 % каждые 2–3 года при минимизации затрат и объема работ по их модернизации. В частности, появились сообщения о выходе на рынок систем воздушной смазки для переоборудования судов во время плановых ремонтов [3], использующие концепции применения воздуха для снижения сопротивления без изменения обводов корпуса судна.

Гидродинамические лаборатории во всем мире активно прорабатывают системы, реализующие различные варианты технологий воздушной смазки. В их числе:

– *Создание единых воздушных каверн с волновым профилем на днище судна.* Это направление долго прорабатывалось в России. Для максимальной эффективности таких каверн требуется создать на днище специальную нишу – выемку для каверны (рис. 1). Подробно результаты проработки судов на воздушной каверне описаны, например, в [4, 5]. По данным модельных испытаний такая технология позволяла прогнозировать для транспортных судов с обводами большой и средней полноты эффект снижения полного сопротивления на тихой воде до 20–25 %, что является недостижимым для других

Fig. 1. Layout for creation of single artificial cavity with wave profile in the hull recess

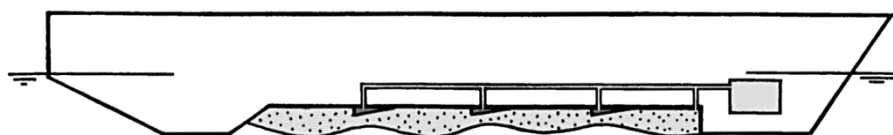


Рис. 1. Схема создания единой искусственной каверны с волновым профилем в нише на корпусе

ЭУ и систем. Анализ аспектов применения метода создания искусственных каверн на днище будет опубликован в отдельной статье.

– **Непосредственный подвод воздуха под корпус судна без формирования ниши.** Для этой технологии исследователи выделяют возможность возникновения в пограничном слое (ПС) на корпусе судна одного из трех видов двухфазного потока (рис. 2):

- a) *Воздушные пузырьки.* Поток воздуха естественным образом или с помощью генератора пузырьков разделяется на пузырьки или микропузырьки, размеры которых малы по сравнению с толщиной ПС, и которые движутся вдоль корпуса с потоком воды.
- b) *Переходный воздушный слой.* С увеличением объема подаваемого воздуха часть разрозненных пузырьков объединяется, формируя островки воздушного слоя, при этом оставшаяся часть воздуха сохраняется в виде пузырьков, двигающихся вниз по течению.
- c) *Развитый воздушный слой.* С дальнейшим увеличением подачи воздуха все пузырьки сливаются в сплошной воздушный слой, покрывающий смоченную поверхность.

Зачастую все виды двухфазных потоков исследуются в одних и тех же работах, т.к. одна форма переходит в другую при увеличении объема подаваемого воздуха. Поскольку в отечественной практике исследования непосредственного подвода воздуха в ПС корпуса судна не проводились, в настоящей статье перспективы применения таких технологий воздушной смазки для внедрения на судах анализируются на базе опубликованных материалов.

– **Гидрофобные покрытия.** В последние годы появился ряд исследований, посвященных применению инновационных гидрофобных и супергидрофобных покрытий, в которых механизм снижения сопротивления трения при обтекании тел жидкостью рассматривается как вариант технологии воздушной смазки. Основные результаты этих исследований также проанализированы в настоящей статье.

– **Создание ряда частичных каверн на днище.** Эта технология может рассматриваться как проме-

жуточная между созданием единой искусственной каверны с волновым профилем и генерацией сплошного воздушного слоя при непосредственном вдуве воздуха в ПС. Она реализуется путем установки на днище судна кавитаторов – выступов, создающих зоны локальных отрывов потока, в которых при подводе воздуха (искусственной вентиляции) образуются каверны, отделяющие воду от днища. Эта технология исследовалась как в России [7, 8], так и за рубежом [9], перспективы и эффективность ее использования будут проанализированы в отдельной статье.

В настоящей статье на базе опубликованных данных и опыта специалистов Крыловского центра по использованию воздуха для снижения сопротивления воды движению судна формируется экспертная позиция по перспективам применения технологии воздушной смазки, связанной с подводом

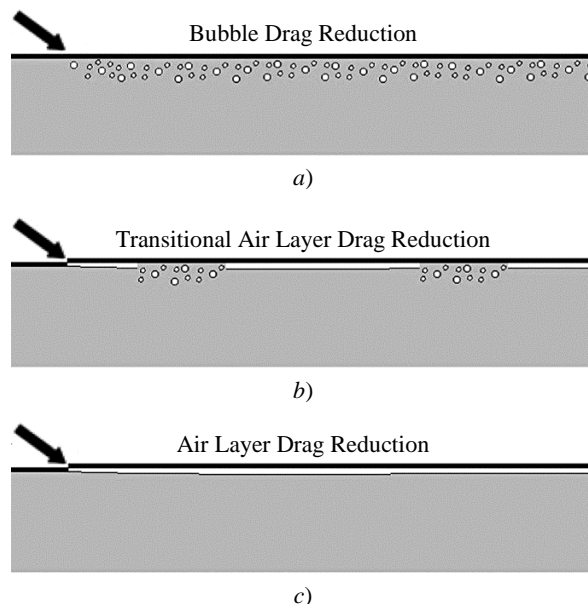


Рис. 2. Виды двухфазных потоков: a) воздушные пузырьки; b) переходный воздушный слой; c) развитый воздушный слой. Направление потока слева направо, стрелка – место ввода воздуха [6]

Fig. 2. Types of two-phase flows: a) air bubbles; b) transitory air layer; c) developed air layer. Flow direction: from left to right. Arrow indicates air supply location [6]

пузырьков воздуха к корпусу. Анализ проводился с целью выявления возможных и перспективных направлений снижения сопротивления для внедрения на суда без изменения их обводов.

Применение подвода пузырьков под корпус судна для снижения сопротивления

Implementation of bubble lubrication system under hull for drag reduction

Из технологий воздушной смазки наиболее привлекательным для судовладельцев выглядит подвод пузырьков воздуха через отверстия в днище – малозатратный вариант, не требующий изменения обводов корпуса и применения наделок. Опубликовано множество статей и патентов с результатами исследований и конструкторских проработок для систем, реализующих эту технологию, а также обзоры, позволяющие проследить ее развитие [10]. Такие системы признаны как одно из средств снижения сопротивления Комитетом по защите морской среды (МЕРС) ИМО (рис. 3).

Примером внедрения такой технологии на натуральных судах являются испытания системы подвода пузырьков на балкере японской фирмы Oshima – партнера Крыловского центра, где зафиксирован эффект снижения эмиссии ~4 % на грузовой осадке и до 8 % на балластной осадке [11]. Судно с такой системой было признано «судном 2012 года» в Японии.

Пионерской работой по снижению сопротивления с помощью пузырьков следует считать эксперименты с измерением сопротивления подводного тела, покрытого пузырьками, образованными электролизом [12]. На постоянной скорости снижение

сопротивления трения в присутствии пузырьков (важно – для подводного объекта, в отсутствие волнового сопротивления) доходило до 30 %. После публикации о таком значительном снижении сопротивления метод стал рассматриваться как весьма перспективный.

В дальнейших многочисленных исследованиях экспериментаторы добивались снижения сопротивления с помощью пузырьков (международное обозначение технологии – BDR, Bubble Drag Reduction) как для течений в каналах и трубах, так и для внешних потоков на различных моделях тел, включая плоские пластины, осесимметричные объекты, модели судов и натурные суда. Это позволило постепенно выявить и определить влияние различных параметров на эффект снижения сопротивления.

Следуя [10], отметим параметры, используемые при исследовании систем подвода воздуха: турбулентный пограничный слой корпуса (ТПС) характеризуется толщиной δ , толщиной вытеснения δ^* и шириной w ; локальное касательное напряжение обозначается τ_w ; вязкая длина $l_v = \nu/u^*$, где ν – кинематическая вязкость жидкости; $u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – скорость трения; размер пузырьков d_B/l_v (обычно нормируется по вязкой длине); число Вебера $We = \rho d_B (u^*)^2/\lambda$, где λ – поверхностное натяжение; объемный поток газа Q нормируется по объему жидкости, протекающей через ТПС перед форсункой:

$$C_Q = Q/Q_W, \quad (1)$$

$$\text{где } Q_W = U_W(\delta - \delta^*).$$

Важный параметр – воздухосодержание (доля пустот в потоке) α , вычисляется по формуле:

$$\alpha = Q/(Q + Q_W) = C_Q/(1 + C_Q). \quad (2)$$

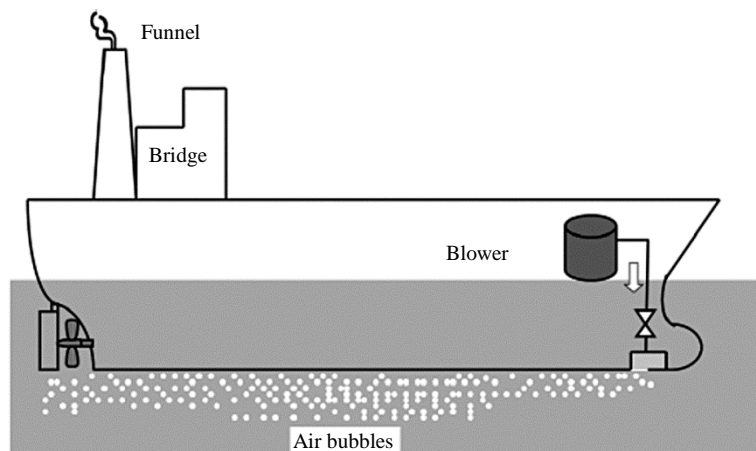


Рис. 3. Схема подвода пузырьков к корпусу судна в документе ИМО

Fig. 3. Layout of bubble supply to hull as per IMO document

В [13] сообщалось о BDR с использованием нагнетания газа для течений над и под плоской поверхностью длиной 1 м при $Re_L \sim 10^6$. Максимальные уровни снижения лобового сопротивления $\sim 80\%$ зарегистрированы при воздухоподдержании $\alpha \sim 0,2$ для конфигурации «пластина сверху воздуха». Эта и ряд других работ из бывшего СССР представляют собой первые подробные исследования BDR.

В [14, 15] исследовалась закачка газа в ТПС участка трубы для $Re_L \sim 10^6$ с вариацией воздухоподдержания в пределах $\alpha < 0,4$ с интегральным снижением лобового сопротивления на $\sim 80\%$ для конфигурации «пластина сверху воздуха». Показано повышение эффективности BDR с уменьшением скорости потока, с усилением нагнетания газа и когда плавучесть помогает удерживать пузырьки в ПС.

В [16, 17] описаны испытания BDR на плоском днище буксируемой модели длиной 50 м с максимальной скоростью буксировки $U = 7$ м/с ($Re_L \sim 10^8$). Зарегистрировано максимальное снижение общего сопротивления до 13 %, предположительно в результате значительного снижения сопротивления трения модели.

В [18] выполнены эксперименты с плоской пластиной длиной 12,9 м и газовыми форсунками, установленными заподлицо с поверхностью. При испытаниях со скоростью до 20 м/с достигалось число Рейнольдса $Re_L \sim 10^8$, ранее не достигавшееся в модельном эксперименте. Воздухоподдержание варьировалось в диапазоне $\alpha < 0,4$. Эксперименты с размером пузырьков от 0,1 до 1,0 мм показали, что пузырьки выталкиваются за пределы ПС уже в нескольких метрах вниз по потоку от инжектора даже на нижней поверхности пластины. В результате вблизи поверхности образовывался слой почти без воздуха, и эффект воздушной смазки почти отсутствовал. Была высказана гипотеза, что на пузырьке в ПС возникают силы, способные преодолеть силы всплытия пузырьков.

Эксперимент показал, что при модельных экспериментах с инъекцией газа имеет место сильный масштабный эффект по числу Рейнольдса. Эффект снижения сопротивления значительно уменьшался с увеличением скорости. Пиковые уровни снижения местного сопротивления трения $\sim 80\%$ достигались непосредственно вблизи форсунки. Как отмечено выше, в технологии BDR при определенных условиях и при большом количестве пузырьков они образуют сплошной или почти сплошной воздушный слой в пристеночной области потока, который от-

деляет поток от поверхности корпуса. В [18] отмечено, что при низкой скорости и большом количестве воздуха тонкий воздушный слой мог формироваться вдоль всей пластины.

В связи с этим, учитывая опыт исследований Крыловского центра, необходимо подчеркнуть различие между технологией BDR, даже с образованием сплошного воздушного слоя, и технологией создания локальных каверн. В лабораторных условиях при ограниченном размере опытных образцов (несколько метров) и неограниченном объеме подаваемого воздуха в многочисленных исследованиях получено существенное снижение сопротивления при больших расходах, когда воздуха настолько много, что он покрывает сплошным тонким слоем всю исследуемую поверхность.

При применении BDR на натуральных судах эффект резко снижается, иногда до 0, что следует объяснить уносом пузырьков воздуха из ПС уже через несколько метров ниже по течению от точки их подачи. Т.е. при использовании пузырей или сплошного воздушного слоя, образующегося массой пузырей, воздух, «проработав» один раз, полностью уносится потоком. Для сохранения эффекта при такой технологии необходимо предусматривать достаточно много мест подачи пузырьков как по ширине, так и по длине корпуса при большом расходе воздуха. При организации частичных каверн для их образования делают ступеньки или пластинки – кавитаторы, а также, как правило, создают еще и «подпорный» элемент (наклонный выступ) в месте расположения хвоста каверны. В кавернах воздух совершает круговое движение, возвращаясь внутри каверны вверх по потоку (вплоть до кавитатора), так что в поток уносится лишь незначительная часть воздуха из хвоста каверны. Это принципиальное отличие двух технологий воздушной смазки дает преимущество технологии искусственной кавитации (частичных каверн), требующей существенно меньшего расхода воздуха.

В лабораторных условиях эксперименты показали, что принципиально важным параметром технологии BDR является размер пузырьков. Отмечена тенденция, что системы снижения сопротивления более эффективны, если генерируются пузырьки малых и даже микроразмеров – в общем случае менее чем 0,1 мм ($d_B/l_v < 10$).

В [19] рассматривалось снижение сопротивления при создании в носовой части модели судна слоя малых пузырьков, который направлялся вдоль корпуса. Эксперименты на модели показали возможность снижения сопротивления до 20 % (с учетом

энергии на подвод пузырьков). Исследовано влияние диаметра пузырьков и показана необходимость установки дополнительных устройств для создания и направления потока пузырьков (которые сами могут генерировать определенное сопротивление).

Суммируя данные, приведенные в обзорах влияния микропузырьков [20, 21], необходимо отметить, что в технологии BDR существует неопределенность по размеру микропузырьков. В потоке микропузырьки возрастают в размере, имеется тенденция к их деформации в сдвиговом потоке и в турбулентных флуктуациях (что типично, когда $We > 1$), и тогда они перестают быть микропузырьками. Тем не менее исследователи различают снижение сопротивления пузырьками и микропузырьками. Для микропузырьков эксперименты с плоской пластиной [22] показали убедительное снижение сопротивления трения до 80 % (по-видимому, такие величины относятся к местному трению в районе форсунок), что объяснялось благоприятным взаимодействием пузырьков с ТПС и не связывалось со снижением вязкости, которая при введении микропузырьков увеличивается. Этот тезис совпадает с выводами работы [23], выполненной в Крыловском центре, где математически показано, что небольшие пузырьки воздуха в ПС за счет сил поверхностного натяжения ведут себя подобно твердым шарикам, препятствующим сдвиговому течению слоев жидкости, что приводит к повышению вязкости жидкости, тем самым увеличивая сопротивление трения. Аналогичный вывод о вязкости жидкости с пузырьками сделан в более поздних публикациях [15, 21, 24].

В [25] показано, что введение микропузырьков становится неэффективным для низких скоростей из-за силы поддержания, а в [26] – что с увеличением числа Рейнольдса в ТПС, наполненном пузырьками, эффект снижения сопротивления уменьшается. Тенденция снижения эффекта с увеличением скорости отмечается во многих цитируемых работах. Таким образом, максимальный эффект пузырьков проявляется лишь в определенном диапазоне скоростей.

В [27] исследована эффективность периодически повторяющегося вдувания пузырьков (RBI – Repetitive Bubble Injection) для снижения сопротивления трения в ТПС модели судна. Эксперименты проводились на модели судна с плоским днищем длиной 36 м, буксируемой со скоростью 8 м/с. Для RBI снижение сопротивления достигало 24 %, что на 5 % лучше, чем для случая непрерывного впрыска пузырьков (CBI – Continuous Bubble Injection).

При применении RBI эффект снижения сопротивления трения наблюдается до 15 раз дальше по потоку по сравнению с CBI, эффект снижения сопротивления становился более устойчивым. Результаты исследований показывают, что стратегия RBI изменяет дисперсию пузырьков таким образом, что эффективная зона снижения сопротивления вдоль корпуса корабля расширяется, предлагая потенциально более эффективный метод снижения сопротивления на морских судах.

Дальнейшее развитие технологии BDR требовало объяснения влияния пузырьков на сопротивление. Если для технологий частичных каверн и воздушного слоя механизм снижения сопротивления предельно ясен и заключается в разделении поверхности корпуса и потока воды воздушным слоем, то, как отмечено в [10], обоснованной теории по механизму снижения сопротивления трения пузырьками в настоящее время нет.

Исследователи предполагают, что, скорее всего, работают несколько процессов: *a*) присутствие газа изменяет среднюю плотность, влияя на вязкость жидкости и, следовательно, на Рейнольдсовы напряжения, что приводит к снижению напряжений трения (это наиболее очевидный и общепризнанный механизм); *b*) пузырьки могут взаимодействовать с турбулентным потоком жидкости, изменяя турбулентный перенос; *c*) пузырьки придают потоку сжимаемость [28]; *d*) к изменениям в потоке могут приводить динамика и взаимодействие пузырей (например, разделение и слияние) [29].

Указанная дискуссия поддерживается рядом работ, использующих метод изучения влияния подвода пузырьков с проведением экспериментов в постановке Тэйлора – Куэтта, рассматривающей течение в тонком канале с водой между противорвращающимися цилиндрами. В [30] показано, что сопротивление снижается только после того, как число Рейнольдса достигает 1 млн, когда пузырьки не могут более рассматриваться как недеформируемые. В [31] отмечено, что пузырьки деформируются с преобладающей ориентировкой по отношению к потоку, снижая турбулентное напряжение, поскольку поток вокруг пузырьков становится более изотропным. В [32] утверждается, что снижение трения получается за счет комбинации снижения плотности и модификации турбулентности. В [33] показано, что пузырьки предотвращают формирование поперечной завихренности около стенки, и это ведет к снижению турбулентной энергии.

В обзоре [21] собраны сведения, отражающие взаимосвязь размеров пузырьков и воздухоудержания, необходимого для наибольшего снижения сопротивления. На малых скоростях пузырьки диаметром порядка нескольких величин вязкой длины потока могут генерировать 10 % снижения сопротивления всего при 1 % объема воздуха в ПС. С увеличением скоростей потока до величин 5–15 м/с значение вязкой длины быстро падает, и необходимы пузырьки такого малого размера, которые трудно производить в больших количествах. В [19] использовались пузырьки диаметром от 0,5 до 2,5 мм, зарегистрировано снижение сопротивления до 40 % при содержании воздуха порядка 10 %.

В [34] с использованием пузырьков диаметром от 0,03 до 0,50 мм зарегистрировано снижение сопротивления порядка 20 % при 20%-м содержании воздуха, однако заметного влияния размеров пузырьков не было найдено.

Можно считать установленным, что наиболее эффективной областью для аккумуляции микропузырьков в ТПС является буферный регион благодаря тому, что при увеличении плотности содержания микропузырьков уменьшается интенсивность турбулентности буферной зоны [35, 36]. В [36] показано, что описанная концентрация микропузырьков между y^+ в диапазоне 15–30 играет доминирующую роль в эффекте изменения структуры турбулентности вдоль пограничного слоя.

Исследование гипотезы о модификациях турбулентности с помощью микропузырьков около твердой стенки существенно осложняется почти полным отсутствием аналитических решений, дефицитом тонких эмпирических исследований, отсутствием

понимания механизма снижения сопротивления микропузырьками. Только с развитием современных экспериментальных технологий появились убедительные аргументы о факторах, объясняющих влияние пузырьков на ПС и, следовательно, на сопротивление. Большой объем информации для формирования представления о механизме влияния пузырьков на местное трение получен в серии работ Murai [37–40].

В обзоре проблемы BRD [37] приводятся фотографии со ссылкой на [38–40], иллюстрирующие структуру потока при различных размерах пузырьков. Изображения на рис. 4 дают основания считать, что присутствие малых пузырьков существенно снижает размеры турбулентности в буферной области ТПС, в то время как крупные пузыри могут даже увеличить масштаб возмущений в потоке. Эти картины коррелируются с полученными ранее данными о наибольшей эффективности мелких и очень мелких пузырьков для снижения сопротивления и возможности даже отрицательного влияния для крупных пузырьков. Исследование влияния на сопротивление пузырьков достаточно большого размера (по сравнению с толщиной ТПС) [37] показало, что пузырьки должны иметь определенный размер для достижения максимальной эффективности. Исследование распределения пузырьков в ТПС [37] позволило также сформулировать предположение, что идеальное условие для снижения сопротивления достигается за счет максимизации плотности пузырьков в точке пикового напряжения сдвига Рейнольдса, обычно расположенной между вязким подслоем и буферным слоем внутри ТПС (толщина буферной области составляет порядка 0,05 δ).

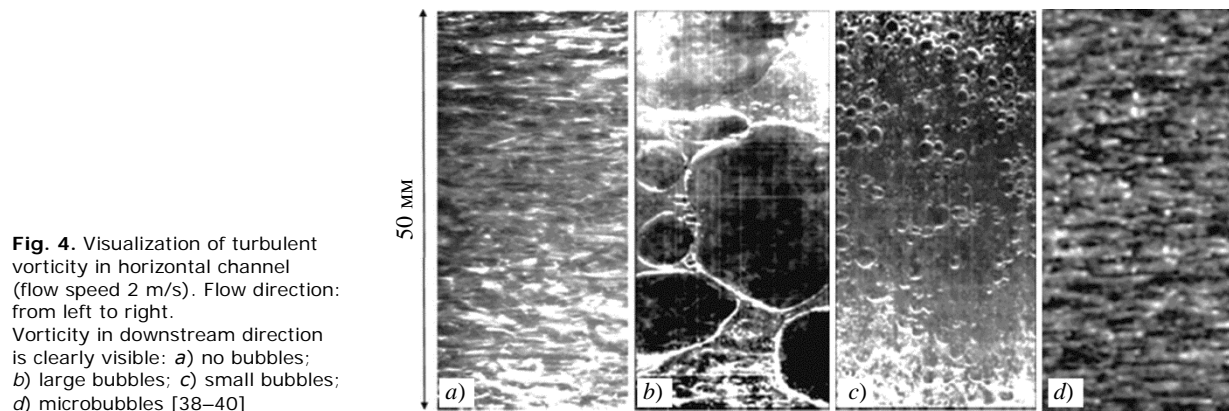


Fig. 4. Visualization of turbulent vorticity in horizontal channel (flow speed 2 m/s). Flow direction: from left to right. Vorticity in downstream direction is clearly visible: a) no bubbles; b) large bubbles; c) small bubbles; d) microbubbles [38–40]

Рис. 4. Визуализация структуры турбулентной завихренности в горизонтальном канале при скорости потока 2 м/с. Поток направлен слева направо. Видна завихренность в направлении потока: а) без пузырей; б) с крупными пузырями; в) с малыми пузырями; д) с микропузырями [38–40]

Кроме того, документально подтверждено, что небольшие пузырьки проявляют естественную склонность к накоплению внутри турбулентного сдвигового слоя, сохраняясь в течение длительного времени внутри ТПС и тем самым противодействуя эффектам турбулентной диффузии. В контексте движущегося корабля эта область совпадает со слоем, наиболее густонаселенным активными турбулентными вихрями, что позволяет маленьким пузырькам оставаться внутри ТПС в течение длительных периодов, эффективно противодействуя турбулентной диффузии.

Необходимо отметить, что развитие методов CFD позволило начать высокоточное численное моделирование многофазных течений и исследовать взаимодействие между пузырьками и турбулентным потоком в пристеночной области в контексте BDR [26, 41, 42]. Показано, что микропузырьки или их скопления могут видоизменять пристеночные вихри в потоке, что приводит к уменьшению сопротивления трения даже при относительно небольших фракциях пустот.

Однако в противоположность исследованиям, рассматривающим влияние малых пузырьков на характеристики турбулентности, большинство экспериментальных результатов получены с пузырьками, размеры которых велики по сравнению с внутренними масштабами, характеризующими ТПС. В этих работах оценка достигаемого уровня снижения сопротивления обычно связывается с долей пустот у стенки (воздухосодержанием), и это поддерживает гипотезу [10], что основными механизмами уменьшения сопротивления являются уменьшение плотности у стенки и взаимодействие пузырьков с пристеночным вихревым потоком.

Согласно обзору [37] до 2014 г. преобладали рассмотренные выше работы, посвященные анализу влияния воздушной смазки на сопротивление в лабораторных условиях на схематизированных моделях. В обзоре отмечены:

- 19 работ по теме «Пузырьки в канале» с различным размером пузырьков, от микро до 10–100 мм, с эффектом снижения сопротивления 2,5–40 % для малых, наиболее реальных для природы пузырьков и 0,3–30 % для микропузырьков;
- 7 работ – исследования для плоской пластины с эффектом 9–25 % для пузырьков и до 90 % при образовании воздушного слоя или каверны;
- 7 работ – исследование течения Тэйлора – Куэтта с эффектами в пределах 10–90 %;
- 5 работ – эксперименты на моделях судов с эффектом снижения сопротивления 11–40 %, при-

чем величины 20–40 % относятся к вариантам с образованием воздушных каверн;

- 6 работ по натурным судам с эффектом от 0 до 30 %, но из них в 2 случаях с эффектом от 14 до 30 % образовалась воздушная каверна. При этом авторы [36] отмечают, что есть только единичные публикации с отчетом о малых эффектах в натуральных условиях, т.к. фирмы не любят афишировать неудачные эксперименты.

Даже многочисленные испытания в лабораторных условиях с разнообразными и противоречивыми данными по эффективности BDR не дали полного представления о технологии BDR, а скорее поставили ряд вопросов, которые требуют ответа для ее применения в масштабе натурального судна.

Так, эти вопросы касаются размеров создаваемых пузырьков, выбора наилучшего метода создания и подвода пузырьков, регулировки их количества, определения оптимального положения точек ввода воздуха. Тут сложности связаны с подверженностью пузырьков деформации, влиянием деформации пузырьков на сопротивление, особенностями создания маленьких недеформированных пузырьков, а в натуральных условиях – с отсутствием возможности контроля формы и размеров пузырьков.

Кроме того, имеет место большой масштабный эффект потока – так что неочевидно, что система, успешно отработанная на модели, может быть столь же эффективной в натуре (меняются толщины пограничного слоя и, в частности, толщина буферного слоя). Все эти сомнения связаны, в частности, с результатами лабораторных исследований [18, 43], которые показали, что по мере увеличения расстояния вниз по потоку от точки ввода газа величина снижения сопротивления уменьшается в результате миграции пузырьков из пристеночной области.

Уже в 2019 г. в обзоре [44] приводится 11 упоминаний о натурном применении BDR, причем результаты также противоречивы. Зарегистрирована следующая эффективность подвода воздуха: отсутствие эффекта – 1 случай; 2 % – 2 случая; 4–6 % – 6 случаев; от 7 до 10 % – 3 случая (для одного судна 5 % – в полном грузу и 10 % – в балласте).

Тем не менее технология BDR продолжает привлекать судовладельцев, т.к. для ее применения с целью снижения сопротивления в идеале не требуется изменения корпуса судна и, в отличие от технологии каверн, нет заметного эффекта увеличения сопротивления при неработающих воздушных системах.

В то же время, с учетом опыта Крыловского центра по организации воздушной смазки, для широкого внедрения технологии BDR необходимо для конкретного судна исследовать и проработать множество технологических вопросов.

При кажущейся простоте оснащение уже построенного судна системой воздушной смазки требует проектной проработки. Так, необходимо спроектировать и разместить на судне систему подвода воздуха, включающую:

- компрессоры (основной и резервный) достаточной мощности, с обеспечением их электропитания, охлаждения и автоматической системы управления;
- при необходимости – ресиверы (после компрессора) для обеспечения возможности регулирования подачи воздуха в трубопроводы, ведущие к корпусу;
- воздуховод большого диаметра с пропускной способностью несколько кубометров в секунду для забора атмосферного воздуха и подвода его к компрессорам;
- систему трубопроводов от компрессоров к днищу судна с разветвителями и запорно-переключающей арматурой;
- генераторы пузырей, устанавливаемые на днище судна;
- датчики расхода подаваемого воздуха и давления в системе;
- при необходимости – устройства для отвода воздуха от гребных винтов и от впускного отверстия системы забора охлаждающей воды.

Установленное оборудование требует дополнительного периодического обслуживания, что, как правило, не вызывает энтузиазма команды. Специалисты, работавшие с практическим применением BDR на судах, указывают также на необходимость борьбы с постепенным зарастанием отверстий системы подвода воздуха за счет морской флоры и фауны, особенно при эксплуатации судов в южных морях.

При решении проектных задач необходимо учитывать, что создание воздушных пузырьков строго определенного размера – не просто подача воздуха через отверстия в наружной обшивке. Это установка снаружи корпуса или в специальных нишах генераторов пузырьков, которые имеют сложные конструкции, защищенные международными патентами. Примеры оформления подвода пузырей показаны на рис. 5.

При этом для предотвращения выхода пузырьков из-под днища в сторону борта и перетекания воздуха с борта на борт на днище судна с системой воздушной смазки может понадобиться установка дополнительных продольных килей. Эти кили, а также устройства для отвода воздуха от винта и, при необходимости, другие выступающие за наружную обшивку дополнительные элементы или ниши в корпусе создают дополнительное сопротивление (о чем не принято упоминать при оценке эффекта воздушной смазки). Если оценить по минимуму сопротивление генераторов пузырей и дополнительных элементов в 1–2 %, то при эффективности BDR 3–5 % полученный выигрыш может оказаться соизмеримым с погрешностью проводимых измерений.

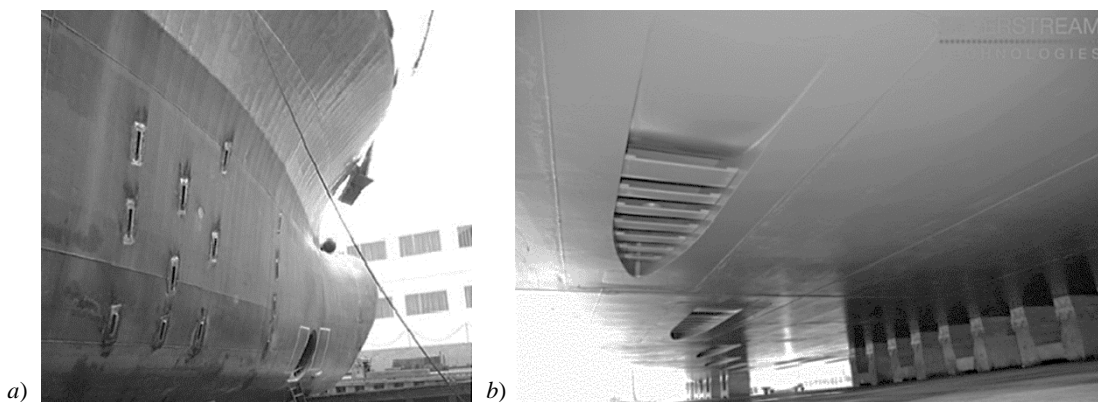


Рис. 5. Примеры организации натуральных систем воздушной смазки: а) устройства WAIP (Winged Air Induction Pipe) на судне Filia Ariea [45]; б) генераторы воздушных пузырьков компании Silverstream [46]

Fig. 5. Examples of full-scale air-lubrication systems: а) WAIP (Winged Air Induction Pipe) aboard Filia Ariea ship [45]; б) air bubble generators by Silverstream [46]

Важнейшим параметром при проектировании системы является необходимый объем подачи воздуха. Проведем приближенную оценку потребного расхода воздуха при генерации пузырьков в технологии BDR, воспользовавшись результатами и рекомендациями рассмотренных выше работ.

Для оценки объемного потока газа Q воспользуемся формулами (1), (2), учитывая, что в приведенных работах при скоростях потока порядка 5–10 м/с эффект подвода пузырьков проявлялся при воздухоудержании $\alpha = 0,2–0,4$. При оценке принято $\alpha = 0,2$. Для определенности оценим расход воздуха для условного танкера длиной 200 м с мощностью главных двигателей 6 МВт и мощностью вспомогательных механизмов 1 МВт. Приняты следующие величины, необходимые для оценки параметров: скорость судна 14 уз (7 м/с); положение сечения отверстий для подвода воздуха $x = 17$ м от носа судна, что соответствует для сечения перед отверстием значению $Re = 10^8$; ширина продольной полосы на корпусе для насыщения воздухом $w = 20$ м (при ширине судна около 35 м – величина w соответствует опыту Крыловского центра по организации каверны на днище с эффективностью снижения сопротивления $\sim 15\%$). Характеристики ТПС принимались по данным для пластины, приведенным в [47] для $Re = 10^8$: $\delta/x = 1,17 \cdot 10^{-2}$; $\delta^*/x = 1,24 \cdot 10^{-3}$. По формуле (1) объем протекающей в ТПС жидкости для принятого сечения у линии отверстий подвода воздуха $Q_w = 7 \cdot 20 \cdot [(0,0117 - 0,00124) \cdot 17] = 24,9 \text{ м}^3/\text{с}$.

Тогда формулу (2) при $\alpha = 0,2$ можно рассматривать как уравнение относительно расхода воздуха Q : $0,2 = Q/(Q + 24,9)$, откуда $Q = 6,22 \text{ м}^3/\text{с}$.

Учитывая, что эффективность подвода пузырей угасает вниз по течению с увеличением расстояния вниз от отверстия для подвода воздуха, в реальных

условиях необходимо размещать на корпусе отверстия в несколько эшелонов вдоль корпуса. При этом с увеличением координаты x (расстояние эшелона отверстий от носа) размерная толщина пограничного слоя будет увеличиваться, и для сохранения величины параметра α необходимо несколько увеличивать расход подводимого воздуха для кормовых эшелонов. Следовательно, при 5 эшелонах отверстий необходимый расход составит уже 30–35 $\text{м}^3/\text{с}$.

Для оценки мощности, потребной для компрессора при таком расходе воздуха, воспользуемся данными каталога центробежных компрессоров (табл. 1). Приведенные данные показывают, что для обеспечения величины расхода, полученной на основании очень приближенной оценки потребного подвода воздуха, требуется работа одного компрессора типа ЗИФ СЦЭ на каждый эшелон отверстий при мощности порядка 1 МВт (14 % мощности главного двигателя судна). Очевидно, такие величины затрат мощности на создание слоя пузырьков неприемлемы. Резервы снижения мощности за счет снижения выходного давления реализованы в компрессоре Dali DLTA 3000, где давление на выходе принято практически минимально возможным для воздушных систем на днище – 1,78 атм с учетом того, что это давление должно «пробивать» статическое давление, равное осадке (~ 1 атм).

Другими путями снижения мощности являются снижение ширины полосы, покрытой воздухом, и снижение воздухоудержания (но не ниже $\alpha = 0,1$). Оба эти мероприятия могут снизить потребный расход в несколько раз. Чтобы ограничить мощность компрессоров приемлемой величиной примерно в 2 % общей мощности на судне 140–150 кВт, расход должен быть снижен примерно в 10 раз, что соответствует данным компрессора Dali DLTA 600.

Таблица 1. Данные центробежных компрессоров (по материалам сайта компании «Энергопроф»)
Table 1. Centrifugal compressor specifications (as per Energo prof web site)

Марка	Производительность, л/мин	Производительность, $\text{м}^3/\text{с}$	Давление, атм	Мощность, кВт
ЗИФ СЦЭ-425.0/0.4	425 000	7,0	4,0	2000
ЗИФ СЦЭ-340.0/0.4	340 000	5,7	4,0	1600
ЗИФСЦЭ-CP440.0/0.25	440 000	7,3	2,5	1600
ЗИФ СЦЭ-340.0/0.25	340 000	5,7	2,5	1250
DALI DLTA4000	380 000	6,3	1,78	1500
DALI DLTA 3000	295 000	4,9	1,78	1000
DALI DLTA 600	40 000	0,67	1,78	150

Насколько эффективен будет такой подход и каков будет баланс снижения сопротивления и мощности на подвод воздуха, оценить невозможно, но ясно, что это будут небольшие величины. Необходимо обратить внимание на то, что повсеместно применяемый для оценок параметр α , в котором количество воздуха относится к массе воды, протекающей по всей толщине ПС, может быть не слишком удачным в свете результатов исследований, показывающих, что основная масса воздуха концентрируется в буферной зоне ПС (~0,1δ).

Трудности с организацией подвода пузырькового воздуха отмечены в [11]. В частности, применение на балкере японской фирмы Oshima автономных компрессоров с электроприводом привели к отрицательному результату (судя по приведенным оценкам, скорее всего это связано с недостатком воздуха). Только после организации подвода воздуха с помощью сложной системы, включающей турбину, вращающуюся за счет выхлопных газов дизеля, сочлененную с соосным двухступенчатым компрессором, удалось наладить приемлемый уровень энергетических затрат на подвод воздуха, что привело к снижению потребной мощности на проточном режиме на 1 МВт из 9 МВт.

Анализ возможных схем организации подвода воздуха за счет энергии выхлопа дизелей приведен в [48], где наряду со схемой, примененной фирмой Oshima, упоминаются проработки схем непосредственной подачи выхлопных газов под днище, а также применение штатного турбокомпрессора, использование энергии выхлопных газов для работы дополнительного электрогенератора или паровой турбины. Такие проработки указывают на наличие серьезных проблем энергообеспечения подвода воздуха при пузырьковой смазке и необходимости минимизации расхода воздуха. Еще один способ снижения расхода воздуха будет рассмотрен во второй части настоящей статьи.

Следует также отметить, что к приведенным выше цифрам эффекта снижения сопротивления в натуральных условиях следует подходить осторожно. Строго говоря, для получения данных об эффекте снижения сопротивления должно быть проведено корректное сопоставление сопротивления (или замеренных в ходе испытаний характеристик ходкости) для исходного судна и судна с подводом воздуха. При этом в идеале нужно сначала выполнить плановое докование судна, провести его ходовые испытания с фиксацией нагрузки, погодных условий, параметров работы главного двигателя и вспомогательных механизмов. После этого нужно снова за-

водить судно в док и монтировать систему подачи воздуха, чтобы потом повторить всю программу ходовых испытаний. Это слишком затратная процедура, которую в нормальных условиях делать никто не будет (ее проведение возможно только в ходе исследовательских работ).

В реальности производители систем подвода воздуха предлагают устанавливать их во время планового ремонта. Соответственно эффект снижения сопротивления будет определяться не относителем исходного судна, а на судне, оборудованном системой подвода воздуха путем включения и выключения подачи воздуха. Для вновь построенного судна другого способа определения эффекта, кроме сопоставления с аналогичными судами той же серии, не существует. Это может вносить определенные искажения в результаты определения эффективности энергосбережения.

Воздушная смазка с применением гидрофобных покрытий

Air lubrication with hydrophobic coatings

Рассмотрение технологии воздушной смазки для снижения сопротивления воды движению судов не будет полным, если не включить в него оценку применения т.н. гидрофобных и супергидрофобных покрытий (ГП и СГП соответственно). При инновационных разработках новых покрытий корпуса судна возможность снижения сопротивления за счет ГП исследовалась в ряде работ. Многие исследователи сходятся на том, что при применении ГП может возникать и реализовываться физический механизм снижения сопротивления за счет эффекта воздушной смазки.

Гидрофобность – это водоотталкивающее свойство покрытия, при котором капля жидкости, попавшая на поверхность, не растекается, а сохраняет форму, близкую к сфере. ГП включают различного рода полимеры или воск, которые уменьшают адгезию молекул воды, обладая низкой поверхностной энергией. При этом при применении ГП поверхность должна быть шероховатой, с определенным размером шероховатости, т.к. при слишком большой высоте шероховатости увеличивается вероятность застревания капель в углублениях, на гладких поверхностях затруднено формирование капель воды. Ключевым понятием в создании ГП является краевой угол смачивания – угол между поверхностью твердого тела и границей жидкой и газооб-

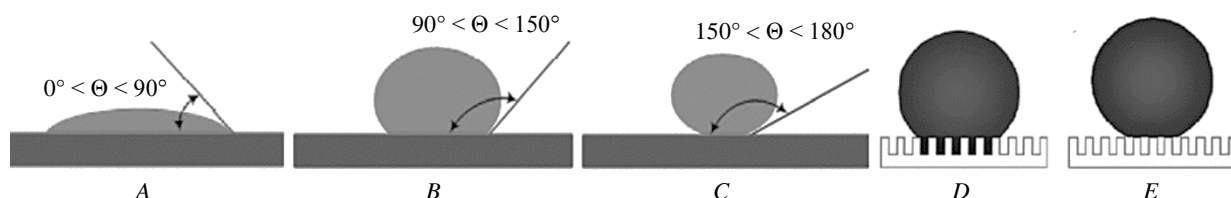


Рис. 6. Терминология гидрофобности: Θ – угол смачивания при взаимодействии капли воды с гидрофильным (A), гидрофобным (B) и супергидрофобным (C) покрытиями. D – состояние Венцеля; E – состояние Кассье [49]

Fig. 6. Definitions of hydrophobicity: Θ – wetting angle of water drop interaction with hydrophilic (A), hydrophobic (B) and super-hydrophobic (C) coatings. D – Wenzel state; E – Cassier state [49]

разных фаз. У гидрофобных материалов этот угол больше 90° . Особо выделяют СГП, у которых данный угол более 150° (в идеале, если капля принимает вид водяного шарика, этот угол равен 180°) (рис. 6).

Исходя из того, что любое покрытие имеет нанорельеф, образованный элементами шероховатости, выделяют два варианта состояния капли на гидрофобной поверхности:

- состояние Венцеля, при котором капля затекает между элементами шероховатости;
- состояние Кассье, при котором вследствие гидрофобных эффектов капля находится над выемками между элементами шероховатости (рис. 6). Именно при этом состоянии возможно снижение сопротивления воды, т.к. остающийся в выемках воздух разделяет воду и поверхность и создает эффект воздушной смазки.

Имеется достаточно много исследований [50–52] как для течений в трубах, так и для обтекания твердых тел с СГП. Для целей настоящей работы необходимо выявить различные аспекты влияния СГП на поток и оценить возможность и перспективы применения СГП как варианта технологии воздушной смазки для судов.

В [49] приведен обзор исследований влияния гидрофобных покрытий, где, в частности, отмечено 2 исследования внешнего обтекания плоской пластины, в которых получен эффект снижения сопротивления за счет применения ГП, 9 % и 50 %. Однако такие эффекты были получены при низких числах Рейнольдса ($5 \cdot 10^6$ и $3,7 \cdot 10^5$), соответствующих ламинарному течению. Отмечено, что при увеличении числа Рейнольдса до $5,8 \cdot 10^5$ во втором случае эффект значительно снижался.

В [50] также описаны собственные эксперименты с пластиной, буксируемой в опытовом бассейне при двух типах покрытий – с контактным углом порядка $135\text{--}140^\circ$ (ГП) и $160\text{--}165^\circ$ (СГП). Согласно результатам экспериментов [50], сопротивление пластины с ГП оказалось выше сопротивления гладкой

пластины на 12–15 % при всех скоростях буксировки (диапазон чисел Re от $3 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^7$). Сопротивление пластины с СГП при числах Re $< 10^6$ было на 12–15 % ниже, чем для пластины без покрытия, однако с увеличением числа Re выше 10^6 , т.е. в турбулентном потоке, сопротивление супергидрофобной и непокрытой пластин сравнялось.

Необходимо отметить, что при испытаниях в опытовом бассейне Крыловского центра 12-м модели с ГП было получено увеличение сопротивления по сравнению с моделью без ГП [49]. Также не показали влияния на сопротивление несколько видов ГП, испытанных на вращающихся дисках в [51], где число Re доводилось почти до 10^7 . Таким образом, сильное снижение эффекта применения ГП с увеличением числа Рейнольдса и переходом в режим ГПС можно считать общепризнанным результатом.

Все авторы, получившие в ходе экспериментов снижение сопротивления трения экспериментального объекта при применении ГП, объясняют механизм снижения тем, что между элементами шероховатости гидрофобного покрытия сохраняется воздух, который обеспечивает т.н. воздушную смазку, т.е. отсекает воду от поверхности между элементами шероховатости. При повышении числа Re и переходе к турбулентному течению этот воздух начинает интенсивно вымываться из выемок между элементами шероховатости, и это уменьшает, а зачастую и сводит к нулю, эффект снижения сопротивления. Также в числе причин уменьшения эффекта снижения сопротивления исследователи отмечают, что присутствие в воде поверхностно активных загрязняющих веществ [53] способствует разрушению т.н. воздушных карманов.

Таким образом, анализ фундаментальных экспериментальных работ, посвященных применению СГП, не дает оснований ожидать заметного снижения сопротивления для условий натурального судна Re $\sim 10^8\text{--}10^9$. Целый ряд изобретений с использова-

нием СГП в виде красок, пленок или листового покрытия (например, [54, 55]) с прогнозом эффекта снижения вязкого сопротивления до 15 % и сопротивления трения до 90 % представляются необоснованными и отражают скорее коммерческие интересы. Однако такое, в принципе, негативное заключение по применению ГП и СГП как средства для непосредственного снижения сопротивления не учитывает дополнительные эффекты применения СГП при использовании их совместно с технологией BDR.

По данным [56], в экспериментах с течением Тэйлора – Куэтта между вращающимися цилиндрами (в котором нет присущих телам судовых обводов растекания и потерь воздуха) устойчивый эффект снижения сопротивления трения при подводе пузырьков воздуха для варианта внутреннего цилиндра с ГП проявлялся при воздухоудержании $\alpha \geq 4\%$ и мог достигать 20–30 %. Однако при замене цилиндра с ГП на цилиндр с обычным покрытием изменение сопротивления составляло всего 2,0–2,5 %.

В [57] исследовалось влияние СГП на развитие воздушного слоя, получающегося при подводе воздуха к поверхности. Целью работы являлся поиск путей снижения расхода воздуха, необходимого для формирования сплошного воздушного слоя.

Отмечено, что эффект снижения сопротивления поверхности с СГП может возникать, когда имеется значительное количество элементов шероховатости, высота которых превышает толщину вязкого подслоя (когда $\kappa^+ > 5$, где κ^+ – соотношение средней шероховатости на поверхности и масштаба вязкой длины потока).

При исследовании возможности комбинирования СГП с традиционной технологией снижения сопротивления путем создания сплошного воздушного слоя в [57] отмечено, что для натурального судна «обычно используется» воздушный поток толщиной порядка 1 см, в то время как размер «карманов» между элементами шероховатости, заполненных воздухом, в СГП имеют порядок величин около 10 микрон. При этом в [57] как большое достижение упоминается работа [58], где рапортуется о получении сплошного газового слоя толщиной порядка 0,5–1,0 мм и удержании его до скорости 4 м/с. Однако технологические детали этого успеха не сообщались, так же как не публиковались сведения о продолжении работ.

В [57] опубликованы данные испытаний плоской пластины длиной около 3 м как покрашенной обычной краской, так и покрытой СГП с контакт-

ным краевым углом смачивания 158° . При испытаниях достигалось максимальное число Рейнольдса по длине порядка $5,1 \cdot 10^6$, воздух подавался на расстоянии 1,3 м от входящей кромки через щель, выступающую «ступенькой» на 6 мм под поверхностью рабочего участка поверхности.

Расход воздуха определялся через величину «номинальной толщины воздушного слоя», вычисляемой по формуле $t_{AL} = Q / (U_\infty S)$ (мм), где Q – объемный расход воздуха при давлении, соответствующем осадке, U_∞ – скорость потока на бесконечности, S – ширина пластины. Эта величина путем изменения расхода подаваемого воздуха варьировалась в пределах от 1 мм до 7,5 мм. Как показано на рис. 7, для формирования стабильного воздушного слоя (air layer – AL) для пластины, покрытой СГП, при постоянном давлении потребный расход воздуха может быть существенно меньше, чем для крашеной поверхности.

Вблизи самого низкого расхода, соответствующего $t_{AL} = 1,0$ мм, воздушный слой на СГП простирается почти по всей 1,8-м длине пластины от щели, через которую подается воздух. Конические возмущения потока обусловлены возмущениями давлений, сходящими от входящей кромки. Для крашеной поверхности при $t_{AL} \approx 1$ мм частичные каверны покрывают примерно 20 % длины пластины и распространяются почти постоянно поперек ширины пластины. При увеличении расхода на пластине с СГП продолжает формироваться устойчивый слой, покрывающий практически всю пластину, в то время как на крашеной пластине наблюдаются небольшие «заплатки» зон взаимодействия жидкости и газа. На СГП пластине равномерный воздушный слой формируется уже при $t_{AL} \sim 2,8$ мм. На крашеной пластине такой слой образуется примерно при $t_{AL} \sim 6,4$ мм. Также в [57] показано, что равномерность воздушного слоя для различных СГП может быть разной, т.е. предварительный выбор СГП может обеспечить наилучший результат по формированию воздушного слоя.

Таким образом, работа [57] показывает, что СГП может быть хорошим дополнением при применении совместно с воздушной смазкой в виде пузырьков или воздушных каверн. Особый интерес представляет предполагаемая возможность формирования с помощью СГП воздушной смазки на тех участках корпуса, где без СГП ее эффективно использовать невозможно, например борта и оконечности судна (это предположение нуждается в проверке в ходе лабораторных исследований, поскольку возможно растекание воздуха).

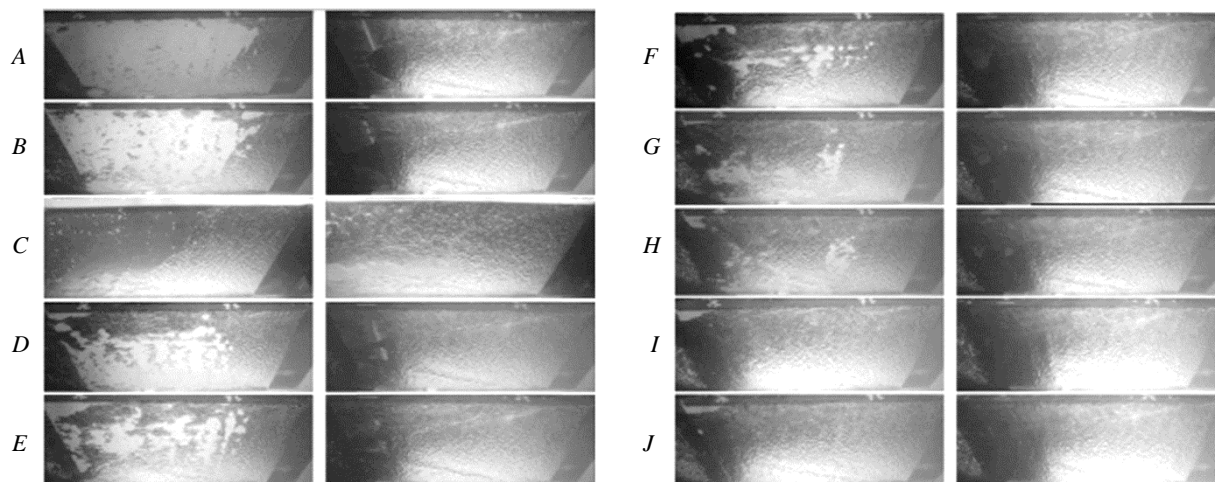


Рис. 7. Картины развития воздушного слоя по данным [57]. Слева в каждой паре – крашеная пластина, справа – пластина с супергидрофобным покрытием. $Re_L = 5,1 \cdot 10^6$. Значения расхода воздуха (параметр t_{AL}): A – 1,0; B – 1,5; C – 1,8; D – 2,1; E – 2,8; F – 3,9; G – 4,9; H – 6,1; I – 6,4; J – 7,5 мм. Поток справа налево

Fig. 7. Air layer evolution patterns [57]. For each pair, on the left is painted plate, on the right is the plate with super-hydrophobic coating. $Re_L = 5.1 \cdot 10^6$. Air flow rates (parameter t_{AL}): A – 1.0; B – 1.5; C – 1.8; D – 2.1; E – 2.8; F – 3.9; G – 4.9; H – 6.1; I – 6.4; J – 7.5 mm. Flow direction: from left to right

Подытоживая вышеизложенное, можно заключить, что по результатам выполненных исследований преждевременно рекомендовать супергидрофобные покрытия для применения в качестве самостоятельной меры для снижения сопротивления судов. При этом представленные данные показывают, что при использовании технологии воздушной смазки, т.е. при подводе воздуха к поверхности корпуса для снижения сопротивления, СГП способствует созданию более равномерного газового слоя при существенно более низком расходе воздуха по сравнению со случаем подвода воздуха к поверхности без СГП.

Заключение

Conclusion

Проведенный анализ аспектов применения технологии воздушной смазки подводом пузырьков воздуха к корпусу позволяет сделать следующие выводы:

- В свете новых требований ИМО по энергосбережению, стимулирующих периодическую модернизацию эксплуатирующихся судов, воздушная смазка подводом пузырьков воздуха является одним из средств, которые могут быть применены на судах и не требуют значительной их модификации (переделки корпуса, установки наделок на днище, организации ниши для каверны).

- Технология воздушной смазки путем подвода пузырьков воздуха к днищу для эксплуатирующихся судов привлекательна для судовладельцев, поскольку ее установка требует минимальных финансовых и временных затрат.
- В лабораторных условиях на небольших моделях и в схематизированных течениях исследователям удавалось получить значительные эффекты снижения сопротивления (десятки процентов). В то же время имеющиеся сведения о единичных прецедентах натурального применения такой технологии показывают, что лишь в ряде случаев удалось достичь эффекта снижения сопротивления порядка 5 %. Также известно, что в ряде случаев натурные испытания с подводом пузырьков к корпусу не выявили даже минимального эффекта улучшения энергоэффективности.
- Ситуация осложняется тем, что механизм снижения сопротивления подводом пузырьков до конца не ясен. Предлагаемые теории описывают различные механизмы влияния пузырьков. При этом наилучшие показатели в лабораторных условиях показывает подвод микропузырьков, который сложно реализовать и контролировать на судне в натуральных условиях. Эффект подвода пузырьков по снижению трения воды о корпус быстро уменьшается при удалении от точки подвода воздуха, что требует создания

нескольких мест подвода воздуха по длине корпуса. Также тщательная модельная проработка системы подвода воздуха (в т.ч. установка ограничительных килей) необходима для обеспечения траектории движения потока пузырьков вдоль корпуса без его растекания и рассеяния.

- Проблемой, решение которой требует значительных усилий при внедрении технологии воздушной смазки, является обеспечение достаточного объема воздуха. При этом указанный объем должен уточняться экспериментально в натурных условиях.
- Представляется перспективной организация воздушной смазки совместно с применением супергидрофобных покрытий, которые могут значительно улучшить устойчивость воздушного слоя и снизить потребный расход подаваемого воздуха. Однако это направление требует дальнейших исследований.

Таким образом, проведенный анализ показал, что применение технологии воздушной смазки подводом пузырьков является привлекательным с точки зрения затрат на ее организацию, но несет значительные риски в части достижимого эффекта.

Список использованной литературы

1. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 1. Анализ руководящих документов, определяющих новую политику снижения эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 4(402). С. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156.
2. Галушина М.В., Дарчиев Г.К., Пустошный А.В. Энергосберегающие устройства: аспекты применения и проектирования. Часть 2. Гидродинамическое проектирование преднасадок и вихрегенераторов // Труды Крыловского гос. науч. центра. 2025. Вып. 2(412). С. 11–25.
3. Airships of the sea // The Economist : [site]. 2010. December 11. URL: www.economist.com/node/17647555 (Accessed: 10.09.2025).
4. Сверчков А.В. Применение искусственных каверн для снижения гидродинамического сопротивления судов // Академик А.Н. Крылов. К 150-летию со дня рождения : сборник статей. Санкт-Петербург : Крыловский гос. науч. центр, 2013. С. 65–82.
5. Горбачев Ю.Н., Буянов А.С., Сверчков А.В. Суда на воздушной каверне: реальный способ повышения энергоэффективности и экологической безопасности // Морской флот. 2015. № 2. С. 28–37.
6. Mäkiharju S.A., Perlin M., Ceccio S.L. On the energy economics of air lubrication drag reduction // International journal of naval architecture and ocean engineering. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 412–422. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0107.
7. Иванов А.Н., Бутузов А.А., Оленин Ю.Л. Вопросы кавитации в задачах снижения гидродинамического сопротивления судов // Проблемы прикладной гидромеханики судна. Ленинград : Судостроение, 1975. С. 151–176.
8. Сверчков А.В., Пустошный А.В., Горбачев Ю.Н. Экспериментальные исследования и проектные проработки по применению воздушных каверн на судах смешанного плавания // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 69(353). С. 23–38.
9. Experimental study on drag reduction by air cavities on a ship model / O. Zverkhovskiy, T. van Terwisga, M. Gunsing [et al.] // Proceedings of 30th Symposium on Naval Hydrodynamics. [Washington], 2014. P. 1–8.
10. Ceccio S.L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection // Annual review of fluid mechanics. 2010. Vol. 42. P. 183–203. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145504.
11. Energy saving by air bubbles. Air lubrication technology applied to MV SOYO : [presentation material] // Sea Japan 2014. Environment technology seminar / Oshima Shipbuilding Company. Tokyo, 2014. 4 p.
12. McCormick M.E., Bhattacharyya R. Drag reduction of a submersible hull by electrolysis // Naval engineering journal. 1973. Vol. 85, No. 2. P. 11–16.
13. Богдевич В.Г., Евсеев А.П. О влиянии газонасыщения на пристенную турбулентность // Исследование по управлению пограничным слоем : сборник науч. статей. Новосибирск : Ин-т теплофизики, 1976. С. 49–61.
14. Madavan N.K., Deutsch S., Merkle C.L. Reduction of turbulent skin friction by microbubbles // Physics of Fluids. 1984. Vol. 27, No. 2. P. 356–363. DOI: 10.1063/1.864620.
15. Madavan N.K., Deutsch S., Merkle C.L. Measurements of local skin friction in a microbubble modified turbulent boundary layer // Journal of Fluid Mechanics. 1985. Vol. 156. P. 237–256. DOI: 10.1017/S0022112085002075.
16. Experimental study on scale effect of drag reduction by microbubbles using very large flat plate ships / T. Takahashi, A. Kakugawa, M. Makino, Y. Kodama // Journal of the Kansai Society of Naval Architects. 2003. Vol. 239. P. 11–20.
17. Mechanisms and scale effects of skin friction reduction by microbubbles / T. Takahashi, A. Kakugawa, S. Nagaya

- [et al.] // Proceedings of 2nd Symposium smart control of turbulence. Tokyo, 2001. P. 1–9.
18. Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer / *W.C. Sanders, E.S. Winkel, D.R. Dowling* [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 552. P. 353–380. DOI: 10.1017/S0022112006008688.
 19. *Moriguchi Y., Kato H.* Influence of microbubble diameter and distribution on frictional resistance reduction // *Journal of Marine Science and Technology*. 2002. Vol. 7. P. 79–85. DOI: 10.1007/s007730200015.
 20. *Ahmadzadehtalatapeh M., Mousavi M.* A review on the drag reduction methods of the ship hulls for improving the hydrodynamic performance // *International journal of maritime technology*. 2015. Vol. 4. P. 51–60.
 21. *Foeth E.J.* Decreasing frictional Resistance by Air lubrication // Proceedings of 20th international Symposium on yacht design and yacht construction. Amsterdam, 2008. 10 p.
 22. *Skudarnov P.V., Lin C.X.* Drag reduction by gas injection into turbulent boundary layer: Density ratio effect // *International journal of heat and fluid flow*. 2006. Vol. 27, No. 3. P. 436–444. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.12.002.
 23. *Желтухин И.Д.* Газонасыщенный пограничный слой на пористой поверхности // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1965. Вып. 219: Сборник статей по прикладным вопросам гидромеханики вязкой жидкости и отрывных течений. С. 55–69.
 24. *Басин А.М., Короткин А.И., Козлов Л.Ф.* Управление пограничным слоем судна: (Основные проблемы). Ленинград: Судостроение, 1968. 491 с.
 25. *Merkle C.L., Deutsch S.* Microbubble Drag Reduction // *Frontiers in Experimental Fluid Mechanics*. Berlin; Heidelberg: Springer, 1989. P. 291–335. (Lecture Notes in Engineering; Vol. 46).
 26. *Ferrante A., Elghobashi S.* On the physical mechanisms of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 503. P. 345–355. DOI: 10.1017/S0022112004007943.
 27. Downstream persistence of frictional drag reduction with repetitive bubble injection // *T. Tanaka, Y. Oishi, H.J. Park* [et al.] // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. P. 113807. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113807.
 28. *Lo T.S., L'vov V.S., Procaccia I.* Drag reduction by compressible bubbles // *Physical Review E. Statistical, nonlinear, and soft matter physics*. 2006. Vol. 73, No. 3, Pt 2. P. 036308. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.036308.
 29. *Meng J.C.S., Uhlman J.S.* Microbubble formulation and splitting in a turbulent boundary layer for turbulence reduction // *Advances in Fluid Dynamics: Proceedings of Symposium in honor of Maurice Holt on his 70th birthday*. New York [et al.]: Springer, 1989. P. 168–217. DOI: 10.1007/978-1-4612-3684-9_14.
 30. Drag reduction in bubbly Taylor-Couette turbulence / *T.H. Van den Berg, S. Luther, D.P. Lathrop, D. Lohse* // *Physical review letters*. 2005. Vol. 94, No. 4. P. 044501 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.044501.
 31. *Kitagawa A., Hishida K., Kodama Y.* Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique // *Experiments in Fluids*. 2005. Vol. 38. P. 466–475. DOI: 10.1007/s00348-004-0926-8.
 32. *Legner H.H.* A simple model for gas bubble drag reduction // *Physic of Fluids*. 1984. Vol. 27, No. 12. P. 2788–2790. DOI: 10.1063/1.864592.
 33. *Kanai A., Miyata H.* Direct numerical simulation of wall turbulent flows with microbubbles // *International journal for numerical methods in fluids*. 2001. Vol. 35, No. 5. P. 593–615. DOI: 10.1002/1097-0363(20010315)35:5%3C593::AID-FLD105%3E3.0.CO;2-U.
 34. *Shen X., Ceccio S.L., Perlin M.* Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction // *Experiments in Fluids*. 2006. Vol. 41, No. 3. P. 415–424. DOI: 10.1007/s00348-006-0169-y.
 35. *Ortiz-Villafuerte J., Hassan Y.A.* Investigation of microbubble boundary layer using particle tracking velocimetry // *Journal of Fluids Engineering*. 2006. Vol. 129. P. 66–79. DOI: 10.1115/1.2174062.
 36. Numerical simulation of microbubble drag reduction using population balance model / *K. Mohanaragam, S.C.P. Cheung, J.Y. Tu, L. Chen* // *Ocean Engineering*. 2009. Vol. 36, No. 11. P. 863–872. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.05.001.
 37. *Murai Y.* Frictional drag reduction by bubble injection // *Experiments in Fluids*. 2014. Vol. 55. P. 1773. DOI 10.1007/s00348-014-1773-x.
 38. Turbulent bubbly channel flow investigated by ultrasound velocity profiler / *Y. Murai, H. Fujii, Y. Tasaka, Y. Takeda* // *Journal of fluid science and technology*. 2006. Vol. 1, No. 1. P. 12–23. DOI: 10.1299/jfst.1.12.
 39. Turbulent shear stress profiles in a bubbly channel flow assessed by particle tracking velocimetry / *Y. Murai, Y. Oishi, Y. Takeda, F. Yamamoto* // *Experiments in Fluids*. 2006. Vol. 41. P. 343–352. DOI: 10.1007/s00348-006-0142-9.
 40. *Murai Y., Qu J.W., Yamamoto F.* Three dimensional interaction of bubbles at intermediate Reynolds numbers // *Multiphase science and technology*. 2006. Vol. 18, No. 2. P. 175–197. DOI: 10.1615/MultScienTechn.v18.i2.40.
 41. *Xu J., Maxey M.R., Karniadakis G.E.* Numerical simulation of turbulent drag reduction using microbubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2002. Vol. 468. P. 271–281. DOI: 10.1017/S0022112002001659.

42. Ferrante A., Elghobashi S. Reynolds number effect on drag reduction in a microbubble-laden spatially developing turbulent boundary layer // *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 543. P. 93–106. DOI: 10.1017/S0022112005006440.
43. Watanabe O., Masuko M., Shiroye Y. Measurements of drag reduction by microbubbles using very long ship models // *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. 1998. Vol. 183. P. 53–63. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1998.53.
44. Air Lubrication Technology / American Bureau of Shipping. Houston, 2019. 15 p.
45. Hydrofoil type of bubble generator for marine drag reduction / Y. Murai, I. Kumagai, Y. Tasaka. [et al.] // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. 2010. Vol. 76, No. 763. P. 483–485. DOI: 10.1299/kikaib.76.763_483.
46. На воздушной смазке // *Море и паромы*: [канал Яндекс.Дзен]. 2021. 15 октября. URL: <https://zen.yandex.ru/media/gruppman/na-vozdushnoi-smazke-616979f21122cb3882f06fad> (дата обращения: 29.01.2026).
47. Кацман Ф.М., Пустошный А.Ф., Штумпф В.М. Пропульсивные качества морских судов. Ленинград: Судостроение, 1972. 512 с.
48. Сверчков А.В. Перспективы использования главного двигателя в качестве источника газа в системе воздушной смазки корпуса // *Труды Крыловского гос. науч. центра*. 2024. Вып. 1(407). С. 49–64.
49. Мирошник Д.Ю., Сверчков А.В. Оценка возможности применения гидрофобных покрытий для снижения гидродинамического сопротивления судов // *Труды международной конференции по судостроению и океанотехнике = International conference on naval architecture and ocean engineering (NAOE-2016)*. Санкт-Петербург, 2016. С. 493–497.
50. Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds Number boundary layer flow / E. Aijallis, M.A. Sarshar, R. Datla [et al.] // *Physic of Fluids*. 2013. Vol. 25. P. 025103. DOI: 10.1063/1.4791602.
51. Орлов О.П., Сверчков А.В. Оценка возможности применения водоотталкивающих покрытий для снижения гидродинамического сопротивления транспортных судов // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2018. Вып. 1(383). С. 43–59. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59.
52. Wang S., Jiang L. Definition of superhydrophobic states // *Advance Materials*. 2007. Vol. 19, No. 21. P. 3423–3424. DOI: 10.1002/adma.200700934.
53. Traces of surfactants can severely limit the drag reduction of superhydrophobic surfaces / F.J. Peau-decerf, J.R. Landel, R.E. Goldstein, P. Luzzatto-Fegiz // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114, No. 28. P. 7254–7259. DOI: 10.1073/pnas.1702469114.
54. Method of forming air film on submerged surface on submerged part-carrying structure, and film structure on submerged surface: pat. 0616940 Europe / Tokunaga J., Kumada M., Sugiyama Y. [et al.]. No. 93921087.8; appl. 29.09.1993; publ. 09.04.1997, Bul. 15. 32 p.
55. System and method for reducing drag on hulls of marine crafts thereby increasing fluid dynamic efficiencies: pat. 12097932 US / J. Dixon. № 18/119324; appl. 09.03.2023; publ. 24.09.2024. 28 p.
56. Bubbly drag reduction using a hydrophobic inner cylinder in Taylor-Couette turbulence / Bullee P.A., Verschoof R.F., Bakhuis D. [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 883. P. A61 (p. 1–24). DOI: 10.1017/jfm.2019.894.
57. Peifer B.C., Callahan-Dudley C., Makiharju S. Air Layer on superhydrophobic surface for frictional drag reduction // *Journal of ship research*. 2020. Vol. 64, No. 2. P. 118–126. DOI: 10.5957/jsr.2020.64.2.118.
58. Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface / K. Fukuda, J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki, Y. Andkunitake // *Journal of marine science and technology*. 2000. Vol. 5, No. 3. P. 123–130. DOI: 10.1007/s007730070009.

References

1. Novelties in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 1. Analysis of regulatory documents governing the new policy of greenhouse gas emission mitigation / V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin, A.V. Pustoshny, O.V. Savchenko // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2022. Vol. 4(402). P. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156 (in Russian).
2. Galushina M.V., Darchiev G.K., Pustoshny A.V. Energy-saving devices (ESDs): application and design aspects. Part 2. Hydrodynamic design of pre-ducts and vortex generators // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2025. Vol. 2(412). P. 11–25 (in Russian).
3. Airships of the sea // *The Economist*: [site]. 2010. December 11. URL: www.economist.com/node/17647555 (Accessed: 10.09.2025).
4. Sverchokov A.V. Artificial cavities for drag reduction of ships // *Compendium of papers to commemorate 150th anniversary of Academician A.N. Krylov*. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2013. P. 65–82 (in Russian).

5. *Gorbachev Yu.N., Buyanov A.S., Sverchkov A.V.* Air-cavity ships: a real way for improving power efficiency and environmental safety // *Morskoy Flot* (Maritime Fleet). 2015. No. 2. P. 28–37 (in Russian).
6. *Mäkiharju S.A., Perlin M., Ceccio S.L.* On the energy economics of air lubrication drag reduction // *International journal of naval architecture and ocean engineering*. 2012. Vol. 4, No. 4. P. 412–422. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0107.
7. *Ivanov A.N., Butuzov A.A., Olenin Yu.L.* Cavitation aspects of ship drag reduction // *Challenges in applied hydromechanics of ships*. Leningrad: Sudostroenie, 1975. P. 151–176 (in Russian).
8. *Sverchkov A.V., Pustoshny A.V., Gorbachev Yu.N.* Experimental study and design activities on application of air cavities for coastal shipping vessels // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 2012. Vol. 69(353). P. 23–38 (in Russian).
9. Experimental study on drag reduction by air cavities on a ship model / *O. Zverkhovskiy, T. van Terwisga, M. Günsing* [et al.] // *Proceedings of 30th Symposium on Naval Hydrodynamics*. [Washington], 2014. P. 1–8.
10. *Ceccio S.L.* Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection // *Annual review of fluid mechanics*. 2010. Vol. 42. P. 183–203. DOI: 10.1146/annurev-fluid-121108-145504.
11. Energy saving by air bubbles. Air lubrication technology applied to MV SOYO : [presentation material] // *Sea Japan 2014. Environment technology seminar / Oshima Shipbuilding Company*. Tokyo, 2014. 4 p.
12. *McCormick M.E., Bhattacharyya R.* Drag reduction of a submersible hull by electrolysis // *Naval engineering journal*. 1973. Vol. 85, No. 2. P. 11–16.
13. *Bogdevich V.G., Yevseev A.R.* Effect of gas saturation upon wall turbulence // *Boundary Layer Management. Compendium of papers*. Novosibirsk : Institute of Thermal Physics, 1976. P. 49–61 (in Russian).
14. *Madavan N.K., Deutsch S., Merkle C.L.* Reduction of turbulent skin friction by microbubbles // *Physics of Fluids*. 1984. Vol. 27, No. 2. P. 356–363. DOI: 10.1063/1.864620.
15. *Madavan N.K., Deutsch S., Merkle C.L.* Measurements of local skin friction in a microbubble modified turbulent boundary layer // *Journal of Fluid Mechanics*. 1985. Vol. 156. P. 237–256. DOI: 10.1017/S0022112085002075.
16. Experimental study on scale effect of drag reduction by microbubbles using very large flat plate ships / *T. Takahashi, A. Kakugawa, M. Makino, Y. Kodama* // *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*. 2003. Vol. 239. P. 11–20.
17. Mechanisms and scale effects of skin friction reduction by microbubbles / *T. Takahashi, A. Kakugawa, S. Nagaya* [et al.] // *Proceedings of 2nd Symposium smart control of turbulence*. Tokyo, 2001. P. 1–9.
18. Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer / *W.C. Sanders, E.S. Winkel, D.R. Dowling* [et al.] // *Journal of Fluid Mechanics*. 2006. Vol. 552. P. 353–380. DOI: 10.1017/S0022112006008688.
19. *Moriguchi Y., Kato H.* Influence of microbubble diameter and distribution on frictional resistance reduction // *Journal of Marine Science and Technology*. 2002. Vol. 7. P. 79–85. DOI: 10.1007/s007730200015.
20. *Ahmadzadehtalatapeh M., Mousavi M.* A review on the drag reduction methods of the ship hulls for improving the hydrodynamic performance // *International journal of maritime technology*. 2015. Vol. 4. P. 51–60.
21. *Foeth E.J.* Decreasing frictional Resistance by Air lubrication // *Proceedings of 20th international Symposium on yacht design and yacht construction*. Amsterdam, 2008. 10 p.
22. *Skudarnov P.V., Lin C.X.* Drag reduction by gas injection into turbulent boundary layer: Density ratio effect // *International journal of heat and fluid flow*. 2006. Vol. 27, No. 3. P. 436–444. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.12.002.
23. *Zheltukhin I.D.* A gas-saturated boundary layer on a porous surface // *Transactions of Krylov Central Research Institute*. 1965. Vol. 219. Compendium of papers on applied hydromechanics of viscous fluid and separated flows. P. 55–69 (in Russian).
24. *Basin A.M., Korotkin A.I., Kozlov L.F.* Boundary layer management of ships: Main challenges. Leningrad: Sudostroenie, 1968. 491 p. (in Russian)
25. *Merkle C.L., Deutsch S.* Microbubble Drag Reduction // *Frontiers in Experimental Fluid Mechanics*. Berlin ; Heidelberg : Springer, 1989. P. 291–335. (Lecture Notes in Engineering ; Vol. 46).
26. *Ferrante A., Elghobashi S.* On the physical mechanisms of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 503. P. 345–355. DOI: 10.1017/S0022112004007943.
27. Downstream persistence of frictional drag reduction with repetitive bubble injection // *T. Tanaka, Y. Oishi, H.J. Park* [et al.] // *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 272. P. 113807. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113807.
28. *Lo T.S., L'vov V.S., Procaccia I.* Drag reduction by compressible bubbles // *Physical Review E. Statistical, nonlinear, and soft matter physics*. 2006. Vol. 73, No. 3, Pt 2. P. 036308. DOI: 10.1103/PhysRevE.73.036308.

29. Meng J.C.S., Uhlman J.S. Microbubble formulation and splitting in a turbulent boundary layer for turbulence reduction // *Advances in Fluid Dynamics : Proceedings of Symposium in honor of Maurice Holt on his 70th birthday*. New York [et al.] : Springer, 1989. P. 168–217. DOI: 10.1007/978-1-4612-3684-9_14.
30. Drag reduction in bubbly Taylor-Couette turbulence / T.H. Van den Berg, S. Luther, D.P. Lathrop, D. Lohse // *Physical review letters*. 2005. Vol. 94, No. 4. P. 044501 (4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.044501.
31. Kitagawa A., Hishida K., Kodama Y. Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique // *Experiments in Fluids*. 2005. Vol. 38. P. 466–475. DOI: 10.1007/s00348-004-0926-8.
32. Legner H.H. A simple model for gas bubble drag reduction // *Physic of Fluids*. 1984. Vol. 27, No. 12. P. 2788–2790. DOI: 10.1063/1.864592.
33. Kanai A., Miyata H. Direct numerical simulation of wall turbulent flows with microbubbles // *International journal for numerical methods in fluids*. 2001. Vol. 35, No. 5. P. 593–615. DOI: 10.1002/1097-0363(20010315)35:5<593::AID-FLD105>3E3.0.CO;2-U.
34. Shen X., Ceccio S.L., Perlin M. Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction // *Experiments in Fluids*. 2006. Vol. 41, No. 3. P. 415–424. DOI: 10.1007/s00348-006-0169-y.
35. Ortiz-Villafuerte J., Hassan Y.A. Investigation of microbubble boundary layer using particle tracking velocimetry // *Journal of Fluids Engineering*. 2006. Vol. 129. P. 66–79. DOI: 10.1115/1.2174062.
36. Numerical simulation of microbubble drag reduction using population balance model / K. Mohanarangam, S.C.P. Cheung, J.Y. Tu, L. Chen // *Ocean Engineering*. 2009. Vol. 36, No. 11. P. 863–872. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.05.001.
37. Murai Y. Frictional drag reduction by bubble injection // *Experiments in Fluids*. 2014. Vol. 55. P. 1773. DOI 10.1007/s00348-014-1773-x.
38. Turbulent bubbly channel flow investigated by ultrasound velocity profiler / Y. Murai, H. Fujii, Y. Tasaka, Y. Takeda // *Journal of fluid science and technology*. 2006. Vol. 1, No. 1. P. 12–23. DOI: 10.1299/jfst.1.12.
39. Turbulent shear stress profiles in a bubbly channel flow assessed by particle tracking velocimetry / Y. Murai, Y. Oishi, Y. Takeda, F. Yamamoto // *Experiments in Fluids*. 2006. Vol. 41. P. 343–352. DOI: 10.1007/s00348-006-0142-9.
40. Murai Y., Qu J.W., Yamamoto F. Three dimensional interaction of bubbles at intermediate Reynolds numbers // *Multi-phase science and technology*. 2006. Vol. 18, No. 2. P. 175–197. DOI: 10.1615/MultScienTechn.v18.i2.40.
41. Xu J., Maxey M.R., Karniadakis G.E. Numerical simulation of turbulent drag reduction using microbubbles // *Journal of Fluid Mechanics*. 2002. Vol. 468. P. 271–281. DOI: 10.1017/S0022112002001659.
42. Ferrante A., Elghobashi S. Reynolds number effect on drag reduction in a microbubble-laden spatially developing turbulent boundary layer // *Journal of Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 543. P. 93–106. DOI: 10.1017/S0022112005006440.
43. Watanabe O., Masuko M., Shirose Y. Measurements of drag reduction by microbubbles using very long ship models // *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*. 1998. Vol. 183. P. 53–63. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1998.53.
44. *Air Lubrication Technology* / American Bureau of Shipping. Houston, 2019. 15 p.
45. Hydrofoil type of bubble generator for marine drag reduction / Y. Murai, I. Kumagai, Y. Tasaka. [et al.] // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. 2010. Vol. 76, No. 763. P. 483–485. DOI: 10.1299/kikaib.76.763_483.
46. On air lubrication // *Sea and steamers* : [Yandex Zen channel]. October 15. 2021. URL: <https://zen.yandex.ru/media/grupppman/na-vozdushnoi-smazke-616979f21122cb3882f06fad> (Accessed: 29.01.2026) (in Russian).
47. Katsman F.M., Pustoshny A.F., Shtumpf V.M. Propulsion performance of sea-going ships. Leningrad : Sudostroenie, 1972. 512 p. (in Russian).
48. Sverchkov A.V. Application prospects of main engine as gas source for air lubrication of hull // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2024. Vol. 1(407). P. 49–64 (in Russian).
49. Miroshnik D.Yu., Sverchkov A.V. Assessment of drag reduction potential for hydrophobic coatings // *Transactions of International conference on naval architecture and ocean engineering (NAOE-2016)*. St. Petersburg, 2016. P. 493–497 (in Russian).
50. Experimental study of skin friction drag reduction on superhydrophobic flat plates in high Reynolds Number boundary layer flow / E. Aijallis, M.A. Sarshar, R. Datla [et al.] // *Physic of Fluids*. 2013. Vol. 25. P. 025103. DOI: 10.1063/1.4791602.
51. Orlov O.P., Sverchkov A.V. Assessing the possibility of applying hydrophobic coatings to reduce hydrodynamic resistance of cargo carriers // *Transactions of Krylov State Research Centre*. 2018. Vol. 1(383). P. 43–59. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-1-383-43-59 (in Russian).
52. Wang S., Jiang L. Definition of superhydrophobic states // *Advance Materials*. 2007. Vol. 19, No. 21. P. 3423–3424. DOI: 10.1002/adma.200700934.
53. Traces of surfactants can severely limit the drag reduction of superhydrophobic surfaces / F.J. Peaudecerf, J.R. Landel,

- R.E. Goldstein, P. Luzzatto-Fegiz* // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, No. 28. P. 7254-7259. DOI: 10.1073/pnas.1702469114.
54. Method of forming air film on submerged surface on submerged part-carrying structure, and film structure on submerged surface : pat. 0616940 Europe / *Tokunaga J., Kumada M., Sugiyama Y.* [et al.]. No. 93921087.8; appl. 29.09.1993; publ. 09.04.1997, Bul. 15. 32 p.
55. System and method for reducing drag on hulls of marine crafts thereby increasing fluid dynamic efficiencies : pat. 12097932 US / *J. Dixon.* № 18/119324; appl. 09.03.2023; publ. 24.09.2024. 28 p.
56. Bubbly drag reduction using a hydrophobic inner cylinder in Taylor-Couette turbulence / *Bullee P.A., Verschoof R.F., Bakhuis D.* [et al.] // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 883. P. A61 (p. 1–24). DOI: 10.1017/jfm.2019.894.
57. *Peifer B.C., Callahan-Dudley C., Makiharju S.* Air Layer on superhydrophobic surface for frictional drag reduction // Journal of ship research. 2020. Vol. 64, No. 2. P. 118–126. DOI: 10.5957/jsr.2020.64.2.118.
58. Frictional drag reduction with air lubricant over a superwater-repellent surface / *K. Fukuda, J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki, Y. Andkunitake* // Journal of marine science and technology. 2000. Vol. 5, No. 3. P. 123–130. DOI: 10.1007/s007730070009.

Сведения об авторах

Пустошный Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник-консультант ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Сверчков Андрей Владимирович, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>.

About the authors

Alexander V. Pustoshny, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher & Consultant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Andrey V. Sverchkov, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector of Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: ksri@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9006-8812>.

Поступила / Received: 23.01.26
Принята в печать / Accepted: 18.02.26
© Пустошный А.В., Сверчков А.В., 2026