




## ТЕОРИЯ КОРАБЛЯ И СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 629.5.015.2  
EDN: BPAUOT

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

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ КАВИТАЦИИ КАК СРЕДСТВА УЛУЧШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ

**Объект и цель научной работы.** На базе опубликованных данных и опыта ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (далее – Крыловский центр) по использованию воздуха для снижения сопротивления воды движению судна проанализированы перспективы применения технологии воздушной смазки, связанной с образованием ряда локальных искусственных каверн на днище. Цель исследования – выявление направлений снижения сопротивления для внедрения на транспортные суда без изменения их обводов.

Настоящая работа является второй статьей, посвященной аспектам применения воздушной смазки на эксплуатирующихся судах в свете необходимости внедрения новых директив Международной морской организации (ИМО, ИМО). В первой статье рассмотрена технология воздушной смазки подводом пузырьков воздуха.

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

**Основные результаты.** В связи с новыми требованиями ИМО по энергосбережению, стимулирующими периодическую модернизацию судов, технология с образованием искусственных каверн на днище может быть привлекательной для транспортных судов, т.к. ее внедрение не требует значительной модификации судна и минимизирует затраты на модернизацию. Эффект применения ряда искусственных каверн может составлять 7–15 % снижения сопротивления. Теоретические основы формирования частичных каверн заложены в трудах ученых Крыловского центра.

**Заключение.** Проведенный анализ показал, что технология воздушной смазки с организацией на днище судна ряда искусственных каверн, которые подпитываются воздухом с помощью системы принудительного подвода, интересна с точки зрения низких затрат на ее организацию при достаточно высоком ожидаемом эффекте снижения сопротивления. Это перспективно для применения на судах, находящихся в эксплуатации, т.к. не требует модернизации обводов корпуса.

**Ключевые слова:** снижение сопротивления судна, искусственная каверна, подвод воздуха.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

## NAVAL ARCHITECTURE

UDC 629.5.015.2  
EDN: BPAUOT

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

# ARTIFICIAL CAVITATION AS ENERGY SAVING TOOL FOR SHIPS

**Object and purpose of research.** Relying on available publication and experience of the Krylov State Research Centre in air-based technologies of drag reduction, the authors analyse the prospects of air lubrication method, i.e. creation

*Для цитирования:* Пустошный А.В., Сверчков А.В., Новиков Д.О. Использование искусственной кавитации как средства улучшения энергоэффективности судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 2(416): 13–30.

*For citations:* Pustoshny A.V., Sverchkov A.V., Novikov D.O. Artificial cavitation as energy saving tool for ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 2(416): 13–30 (in Russian).

of numerous local air cavities on ship bottom. The purpose of the study was to identify feasible ways of drag reduction for cargo ships without changing their hull lines.

This paper is the second article on various aspects of implementing air lubrication technologies aboard in-service ships so as to make them compliant with new directives of International Maritime Organization (IMO). The first paper deals with bubble-based air lubrication technologies.

**Materials and methods.** This paper is an analytical review of available publications. It also presents theoretical estimates for various implementation aspects of artificial-cavity technology.

**Main results.** In the light of new IMO requirements for energy efficiency that stimulate regular upgrade of ships, the technology of bottom air cavities could be an attractive solution for cargo ships because it does not require any major modifications of ship structures, so the costs of upgrade will be minimum. The gain in dry reduction offered by a number of local air cavities could be as high as 7–15 %. Theoretical fundamental of local cavity formation are described by researchers in the publications of the Krylov State Research Centre.

**Conclusion.** The analysis has shown that air lubrication technology based on sequence of a local cavities maintained by the air feed system is a viable solution because its capital costs are low and its expected efficiency in drag reduction is high enough. Therefore, this technology will be practicable for in-service ships because it does not require any alterations of their hull lines.

**Keywords:** drag reduction, artificial cavity, air feed.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

В 2023 г. Международная морская организация ввела новые контрольные параметры энергосбережения, а также механизм их ежегодного ужесточения. Эти параметры стали актуальными не только для новых, но и для уже находящихся в эксплуатации судов. Чтобы соответствовать новым параметрам, судовладельцу необходимо постоянно (с периодичностью 3–6 лет) проводить мероприятия, направленные на снижение судном объема годовой эмиссии углекислого газа [1].

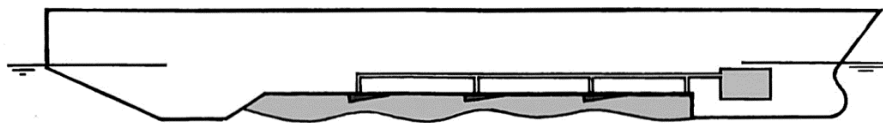
Эти нововведения сделали вновь актуальными меры, обеспечивающие небольшое (3–5 %) улучшение энергоэффективности при минимальном, в интересах судовладельцев, объеме модернизации судов. В частности, такая постановка задачи для эксплуатирующихся судов придала новый импульс интереса к снижению их сопротивления внедрением различных технологий воздушной смазки, применение которых не требует изменения обводов корпуса при переоборудовании во время плановых ремонтов.

Гидродинамические лаборатории во всем мире активно прорабатывают системы, реализующие различные варианты технологий воздушной смазки. Ряд лабораторий развивают направление по созданию слоя воздушных пузырьков под днищем. Как разновидность такой технологии, при большом объеме

пузырьков можно добиться, что их пелена сольется в тонкий слой воздуха. Аспекты создания «пузырьковой» технологии воздушной смазки проанализированы в первой части настоящего исследования [2].

В качестве выводов в [2] отмечено, что физический механизм снижения сопротивления при подводе пузырьков до конца не выяснен, исследователи обсуждают несколько вариантов. Для опубликованных случаев применения пузырьковых технологий на натуральных судах зафиксированы различные результаты (в среднем около 5 % снижения сопротивления), однако в ряде случаев эффект оказывался равным нулю, и дать объяснение таким результатам не представлялось возможным. Эффект снижения сопротивления при непосредственном подводе воздуха под корпус судна заметно увеличивался, когда пузырьки сливались в единый воздушный слой, однако потребности энергии для подвода воздуха в этом случае могли оказаться сопоставимы с эффектом, обусловленным снижением сопротивления. Т.е. для таких технологий остро стоит проблема энергозатрат для обеспечения потребного количества воздуха.

Альтернативной технологией является создание искусственных (вентилируемых) каверн на днище. При этом возможно создание единой каверны вдоль всего корпуса в специальной нише, формируемой на днище судна в процессе его строительства (рис. 1), или создание ряда коротких искусственных каверн,

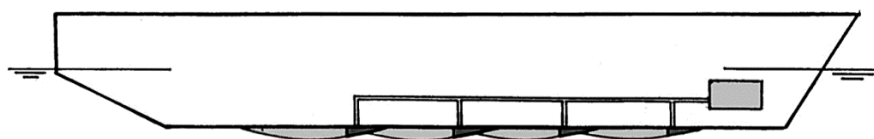


**Рис. 1.** Единая каверна с волновым профилем, формируемая в днищевой нише [3]

**Fig. 1.** Single cavity with wave profile in bottom recess [3]

**Рис. 2.** Система коротких каверн [3]

**Fig. 2.** System of short cavities [3]



образование которых связано с подводом воздуха к зонам локального отрыва потока за последовательно установленными на корпусе выступами – кавитаторами (рис. 2). Отделяя воду от днища, каверны способствуют снижению сопротивления трения.

В [2] отмечалось, что технология создания каверн на днище имеет принципиальное преимущество по расходу воздуха перед технологией организации завесы пузырьков или образования сплошного слоя газа. В лабораторных условиях для опытных образцов длиной несколько метров и при отсутствии ограничений объема подаваемого воздуха пузырьки или воздушный слой могут обеспечить существенное снижение сопротивления. Однако при применении пузырьковой технологии на натуральных судах эффект резко снижается, иногда до нуля, что можно объяснить уносом пузырьков из пограничного слоя (ПС) уже через несколько метров ниже по течению от точки подачи воздуха. Т.е. при использовании пузырей или сплошного слоя, образующегося при слиянии массы пузырей, весь подаваемый воздух полностью уносится потоком.

Для сохранения эффекта при такой технологии необходимо предусматривать достаточно много мест подачи пузырьков по длине корпуса и, соответственно, обеспечивать большой расход воздуха. При организации каверн воздух, подаваемый в созданную искусственную каверну, совершает внутри каверны круговое движение, возвращаясь вверх по потоку (вплоть до кавитатора), так что в поток уносится лишь незначительная часть воздуха из хвоста каверны. Более того, при последовательном расположении каверн уносимый воздух не выносится потоком на поверхность, а подпитывает последующие каверны. Это принципиальное отличие двух технологий воздушной смазки дает преимущество технологии частичных каверн, требующей существенно меньшего расхода воздуха.

В России, и прежде всего в Крыловском центре, в течение длительного времени прорабатывалась технология создания на днище транспортного судна единых воздушных каверн с волновым профилем, что позволило накопить наибольший научный опыт применительно к этой технологии. Для максимальной эффективности таких каверн требуется создать на днище специальную нишу (выемку), размеры

которой оптимизируются, как правило, в ходе модельных испытаний (рис. 1). Подробно результаты проработки судов на воздушной каверне описаны, например, в [3]. По данным модельных испытаний такая технология позволяет прогнозировать для транспортных судов с обводами большой и средней полноты эффект снижения полного сопротивления до 20–25 %, что является недостижимым для других энергосберегающих устройств и систем.

Указанные разработки вызвали заметный интерес за рубежом. Так, по контракту с фирмой Oshima Shipbuilding Co., Ltd. (Япония) в 2004 г. была детально разработана система организации каверн для балкеров класса Handymax водоизмещением 50 000 т. Пересчет результатов модельных испытаний на натурное судно подтвердил эффект снижения сопротивления на 20 % для хода на тихой воде. По контракту с итальянской фирмой Navalprogetti S.r.l. в 2018 г. проведены исследования ходовых и маневренных качеств контейнеровоза для внутренних водных путей [4], в ходе которых показан эффект применения разработанной системы создания каверн в нише до 20 %.

В дальнейшем в рамках госзаказа выполнены дополнительные проработки, направленные на повышение эффективности систем создания каверн при эксплуатации судов. В частности, показана возможность создания ниши для каверны внутри пространства двойного дна, т.е. без изменения полезного объема судна. Кроме того, разработаны системы с механизацией кавитаторов, что позволяет избежать увеличения сопротивления в условиях, когда кавернообразование осложнено (например, во время шторма).

Однако создание каверн в нише на корпусе применимо только при проектировании и строительстве нового судна. Задачей настоящей работы является оценка эффективности систем образования искусственных каверн для эксплуатирующихся судов, без изменения их исходного корпуса. Поэтому технология создания каверн в нише на корпусе в статье больше не рассматривается. Дальнейший анализ сосредоточен на технологии создания частичных искусственных каверн, которые отвечают поставленной задаче – созданию воздушной смазки с минимальным объемом модификации исходного корпуса.

## 1. Теоретические основы образования каверн

### 1. Theoretical fundamentals of air cavity formation

Теоретические основы формирования каверн созданы в ставших классическими работах А.А. Бутузова [5–7], который решил задачу кавитационного обтекания клина, помещенного на нижнюю поверхность горизонтальной пластины. Предложенное им решение этой задачи впоследствии приобрело фундаментальное значение для целого практического направления использования воздушных каверн для снижения гидродинамического сопротивления тихоходных транспортных судов.

Следует отметить, что в последние годы полученные Бутузовым результаты, позволяющие определить предельную длину каверны, широко используются за рубежом: как в печати (например, [8, 9]), так и в патентах (например, патент голландской компании DK Group [10]). При этом при наличии массы зарубежных публикаций по созданию каверн ссылки на работы Бутузова постепенно исчезают. Чтобы подчеркнуть пионерский характер работ ученого, приведем кратко его теоретическое решение и основные полученные результаты, следуя [5].

Рассматривается двумерная схема кавитационного течения, представленная на рис. 3. На схеме выделены сечение насадка (кавитатора), границы каверны и сечение т.н. фиктивного насадка в кормовой части каверны, на котором происходит ее замыкание. Фиктивный насадок позволяет реально существующее нестационарное течение в хвосте каверны, где происходит унос подаваемого в каверну газа, заменить стационарным течением. Жидкость считается идеальной, весомой, а течение – безвихревым и установившимся. Для этого случая давление в произвольной точке течения может быть определено по теореме Бернулли

$$P = \rho \frac{V_\infty^2}{2} + P_\infty - \rho \frac{V^2}{2} - \rho g y, \quad (1)$$

где  $P$  – давление в произвольной точке потока;  $P_\infty$  – давление в невозмущенном потоке по линии  $y = 0$ ;  $V$  – скорость потока в точке, в которой определено

давление;  $y$  – ордината этой точки;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\rho$  – плотность жидкости.

Поскольку давление при переходе из каверны в поток через границу меняется непрерывно, на самой границе оно равно давлению в каверне  $P_k$ . Приравняв правую часть (1)  $P_k$ , с учетом формулы для числа кавитации  $\sigma = (P_\infty - P_k)/(\rho V_\infty^2/2)$  можно получить соотношение, связывающее число кавитации со скоростью на границе каверны и ординатами точек границ каверны

$$\sigma = \frac{2}{Fn^2} y_1 + \left( \frac{V}{V_\infty} \right)^2 - 1, \quad (2)$$

где  $Fn = V / \sqrt{gb}$  – число Фруда;  $b$  – длина насадка;  $y_1$  – ордината произвольной точки границы каверны, отнесенная к длине насадка.

Скорость на границе каверны  $V$  связана с формой насадка и формой границы каверны. Если найти эту связь и подставить в (2), то получится соотношение, позволяющее при заданной величине числа кавитации  $\sigma$  определить ординаты границы каверны  $y_1$ . Практический интерес представляют только тонкие каверны, т.е. такие, у которых отношение максимальной толщины к длине мало. Тогда, согласно теории обтекания тонких тел, величина  $V$  будет мало отличаться от  $V_\infty$  ( $u/V_\infty \ll 1$ ):

$$V = V_\infty + u. \quad (3)$$

После подстановки (3) в (2) и пренебрежения квадратами  $u/V_\infty$  по сравнению с первыми степенями мы получаем линеаризованное соотношение:

$$\frac{1}{2} \sigma = \frac{1}{Fn^2} y_1 + \frac{V}{V_\infty}. \quad (4)$$

Согласно линейной теории, обтекание тонкого тела можно заменить обтеканием гидродинамических источников, распределенных по оси  $x$  между передней и задней кромками тела. При этом интенсивность источников связана с формой тела

$$q = 2V_\infty \frac{dy}{dx}, \quad (5)$$

где  $q$  – интенсивность источников;  $dy/dx$  – тангенс угла между касательной к поверхности тела и осью  $x$ .

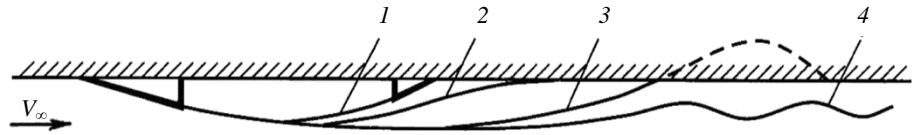


Рис. 3. Схема кавитационного течения [5]

Fig. 3. Layout of cavitating flow [5]

**Рис. 4.** Расчетная форма каверны при разной ее длине [5]

**Fig. 4.** Design shape of cavity with variation of its length [5]



В допущениях линейной теории существует также связь между интенсивностью источников и вызванной скоростью на поверхности тела  $u$ :

$$u = \frac{1}{2\pi} \int_0^{b+l+b_1} \frac{q(\xi)d\xi}{x-\xi}. \quad (6)$$

С учетом (5) и (6) можно вместо соотношения (4) написать окончательное уравнение для определения границ каверны:

$$\frac{1}{\text{Fn}^2} y_1(x) + \int_b^{b+l} \frac{d\eta_1(\xi)}{x-\xi} d\xi = \frac{1}{2} \sigma + f(x), \quad (7)$$

$$\text{где } f(x) = -\int_0^b \frac{d\eta_0}{x-\xi} d\xi - \int_{b+l}^{b+l+b_1} \frac{d\eta_2(x)}{x-\xi} d\xi;$$

$\eta_0(\xi)$  – текущие ординаты точек поверхности основного насадка;  $\eta_2(\xi)$  – текущие ординаты точек поверхности фиктивного насадка.

При решении задачи для получения плавного смыкания границы каверны с фиктивным насадком его нельзя заранее фиксировать, а следует определять с точностью до одного постоянного параметра. При практических расчетах в качестве фиктивного насадка удобно брать клин фиксированной длины  $b_1$  и с произвольным углом наклона  $\alpha$  к оси  $x$ . Поскольку  $\eta_0(\xi)$  – величина заданная, а  $\eta_2(\xi)$  – задана с точностью до  $\alpha$ , то  $f(x)$  будет заданной функцией  $x$  и неизвестного параметра  $\alpha$ .

Таким образом, уравнение (7) содержит два неизвестных параметра:  $l$  и  $\alpha$ . Для их определения можно составить два дополнительных соотношения. Поскольку контур, составленный из границ насадков и каверны, замкнутый, то

$$\int_0^{b+l+b_1} \frac{dy}{dx} dx = 0. \quad (8)$$

Второе соотношение вытекает из требования плавного смыкания задней части границы каверны с фиктивным насадком

$$\frac{dy}{dx} = \alpha \text{ при } x = b + l. \quad (9)$$

Уравнения (7)–(9) полностью определяют математическую задачу нахождения формы границы каверны. При известной границе каверны с помощью (5) и (6) легко может быть найдено распределение скоростей на насадке, по теореме Бернулли определено распределение давлений и по давлениям вычислено кавитационное сопротивление. Уравнения (7)–(9) удобно решать численным методом, при этом целесообразно длину каверны  $l$  считать заданной, а число кавитации  $\sigma$  определять в процессе решения.

Численное решение кавитационного обтекания тонкого клина, расположенного на нижней стороне плоской горизонтальной пластины, позволило обнаружить ряд закономерностей, имеющих большой практический интерес (рис. 4).

Если зафиксировать размеры насадка и скорость набегающего потока, то можно проследить следующую картину изменения формы границы каверны в зависимости от ее длины. При сравнительно небольших длинах каверна имеет форму, изображенную на рис. 4 (каверна 1). По мере увеличения длины каверны угол  $\alpha$  фиктивного насадка уменьшается и в пределе становится равным нулю (каверна 2). Это соответствует режиму течения, при котором хвост каверны касается поверхности пластины. Дальнейшее увеличение длины приводит к форме каверны, обозначенной 3. Здесь часть каверны «протыкает» пластину (пунктир). При бесконечной длине каверны 4 за основной впадиной появляется волновой шлейф, распространяющийся в бесконечность.

По мере увеличения длины каверны происходит также постепенное уменьшение числа кавитации  $\sigma$ , которое при форме каверны 1 имеет положительное значение, затем переходит через ноль, а форме каверны 4 соответствует уже отрицательное значение  $\sigma$  (когда давление воздуха в каверне  $P_k$  выше давления в потоке  $P_\infty$ ).

Результаты расчетов хорошо отражают реальную картину течения, которую удавалось наблюдать на моделях в опытовом бассейне и кавитационной трубе.

Форма каверны 1 соответствует течению с нестационарными движениями в ее хвосте, сопровождающимся образованием обратной струйки

(при постановке задачи нестационарное течение в хвосте моделировалось фиктивным насадком). Форма каверны 1 при искусственной кавитации малоустойчива. Под воздействием внешних возмущений каверна стремится сильно укоротиться или же перейти в форму 2. Укороченная каверна имеет бурное замыкание.

Форма каверны 2 обладает двумя замечательными свойствами. Поскольку она замкнута, то теоретически для ее поддержания не требуется подачи газа, практически же, на моделях, расход газа получается ничтожно малым. По результатам наблюдений в кавитационной трубе, если нет заметных возмущений в потоке, то такая каверна сохраняется много минут даже при отключенном источнике подачи воздуха. Другое свойство этой каверны заключается в том, что при форме 2 кавитационное сопротивление теоретически равно нулю, практически же очень мало.

Форма каверны 3 соответствует нереальной картине течения, на практике не реализуется, и течение при очень больших количествах подаваемого газа переходит от формы 2 к форме 4 с волновым шлейфом.

Как показали опыты на моделях речных транспортных судов, выполненные в России в начале 2010-х гг. [11], для каверны формы 4 с волновым шлейфом объем подаваемого газа можно уменьшить до приемлемых величин, если на место фиктивного насадка, применяемого при теоретическом решении задачи, в эксперименте на плоской пластине на некотором удалении от кавитатора установить дополнительный насадок, на котором будет происходить плавное замыкание каверны (рис. 5). В этом случае поверхность каверны приобретает волновой профиль, а ее длина становится достаточной для изоляции от контакта с водой всего плоского днища судна. За вторым насадком можно сформировать короткую каверну, обеспечивающую его безотрывное обтекание и увеличивающую изолируемую от воды площадь днища (рис. 5).

Возвращаясь к коротким кавернам, можно сделать вывод, что для снижения гидродинамического

сопротивления путем подачи газа под днище судна наибольший практический интерес представляет кавитационное течение, при котором граница каверны реализует форму 2. Как показали расчеты, такое течение соответствует вполне определенному значению числа Фруда, построенному по длине каверны  $Fn = 0,55$ .

При фиксированной скорости набегающего потока и при отсутствии внешних возмущений (например, от носовой оконечности судна) длина каверны формы 2 (в м) также является фиксированной и ее можно связать со скоростью судна (в м/с) формулой

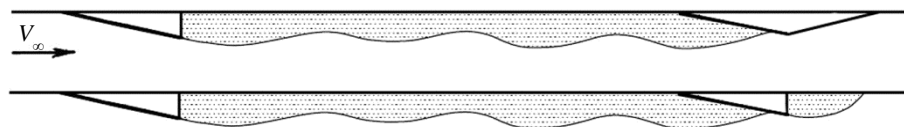
$$l = 0,34V^2. \quad (10)$$

## 2. Разработки системы частичных каверн за кавитаторами на днище

### 2. Developments of partial-cavity systems behind bottom cavitators

Диктуемая правилами ИМО необходимость постоянного улучшения характеристик энергоэффективности эксплуатирующихся судов привела к тому, что стала развиваться концепция применения воздуха для снижения сопротивления без изменения исходных обводов судна. Появились сообщения о том, что на рынок вышли системы воздушной смазки для переоборудования судов во время плановых ремонтов. С этой точки зрения наиболее привлекательным является метод создания на днище последовательности частичных (или локальных) каверн, образующихся за кавитаторами при искусственной вентиляции.

Исследования по отработке системы образования частичных каверн и определению их эффективности впервые выполнялись в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова (с 2012 г. – ФГУП «Крыловский государственный научный центр») в период с 1961 по 1969 г. и были доведены до испытаний трех натуральных объектов [5]. Их основные характеристики приведены в табл. 1.



**Рис. 5.** Каверна с волновым профилем. Вверху – с дополнительным кормовым насадком, внизу – с образованием дополнительной короткой каверны

**Fig. 5.** Cavity with wave profile: with additional stern piece (*top*) and with formation of supplementary short cavity (*bottom*)

При анализе материалов испытаний обращает на себя внимание достаточно большая (1 м) длина кавитатора. При таком соотношении высоты (0,05 м) и длины использовался эффект отрыва за уступом на поверхности, а не эффект интерцептора – отрывника. Кроме того, применяемая конструкция с длинным кавитатором дополнительно позволяла направить воздух непосредственно в поток за выступом около стенки. Впоследствии, как будет показано ниже, в ряде систем создания каверн принималась значительно меньшая длина кавитатора: вплоть до 0 (когда роль кавитатора играла вертикальная пластина, что значительно проще при монтаже, но менее универсально с точки зрения диапазона скоростей судна, при котором достигается наибольший эффект каверн, и поэтому требует применения большего числа кавитаторов по длине).

При анализе представленных в табл. 1 данных нужно учитывать, что расстояние между кавитаторами не обязательно были равны предельной длине каверны (т.е. каверны не обязаны были закрывать расстояние между кавитаторами на всех скоростях). Эти расстояния выбирались в ходе модельных испытаний из соображений наиболее эффективной работы каверн в определенном диапазоне скоростей вблизи эксплуатационной.

Во всех случаях при натурных испытаниях затраты мощности на подвод воздуха не превышали 2–3 % энергетических затрат на движение, что при эффекте снижения потребной мощности порядка 20 % и даже 10 % вполне приемлемо.

Опыт, полученный в рамках исследований по созданию транспортных судов с кавернами, позволяет сформулировать необходимые условия для создания эффективных искусственных каверн:

- наличие клина, наклонной пластины или невысокой вертикально установленной пластины (кавитатора) для создания отрыва потока, в зоне которого при подводе туда воздуха формируется искусственная каверна;
- наличие продольных килей, из которых бортовые кили препятствуют уносу воздуха в сторону борта, а дополнительные (промежуточные) кили препятствуют перетеканию воздуха в поперечном направлении;
- устройство (как правило, в виде наклонной пластины) на котором происходит замыкание каверны и которое служит для формирования следующей каверны.

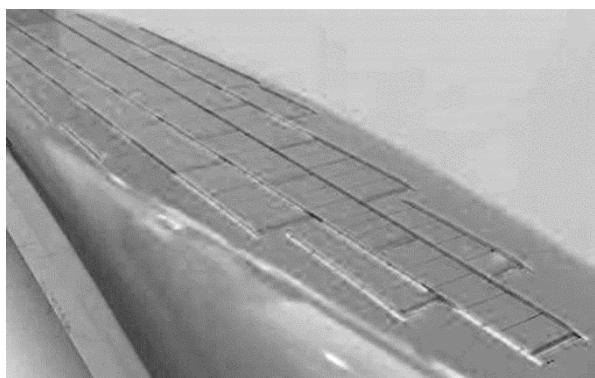
Все эти условия могут быть воспроизведены созданием на днище судна последовательного ряда ячеек, формирующих частичные каверны. Элементы ячеек могут крепиться к исходному корпусу, без изменения исходных обводов корпуса.

Изучение частичных каверн выполнялось рядом зарубежных компаний. Наиболее полный цикл исследований провела фирма Damen (Нидерланды). В рамках программы развития системы воздушных каверн DACS (Damen Air Cavity System) были исследованы условия образования каверн в кавитационной трубе [12–14], испытан ряд моделей судов в опытовом бассейне [14–16], проведены натурные

**Таблица 1.** Основные характеристики речных большегрузных судов с системой каверн

**Table 1.** Main parameters of large river-going ships with air cavity systems

Проект судна	461Б	507Б	Двухсекционный состав		
			общие данные	головная секция	концевая секция
Длина, м	84,6	135,0	193,4	96,0	97,2
Ширина, м	14,0	16,5	14,0	14,0	14,0
Осадка, м	3,2	3,2	3,5	3,5	3,5
Водоизмещение, т	3270	6140	8550	4260	4290
Скорость, км/ч	16	20	16,2	16,2	16,2
Количество кавитаторов, шт.	7	7	–	8	–
Высота кавитатора, мм	50	50	50	–	–
Расстояние между кавитаторами, м	7–9 м	13,5	–	7,85	–
Снижение мощности, %	23–26	16–17	10	до 15 для 1 секции	–



**Рис. 6.** Днище модели морского пассажирского судна с DACS (вид с носа) [15]

**Fig. 6.** Bottom of sea-going passenger ship with Damen Air Cavity System (DACS), forward view [15]



**Рис. 7.** Днище судна с установленными продольными килями и поперечными кавитаторами [21]

**Fig. 7.** Ship bottom with longitudinal keels and transverse cavitators [21]

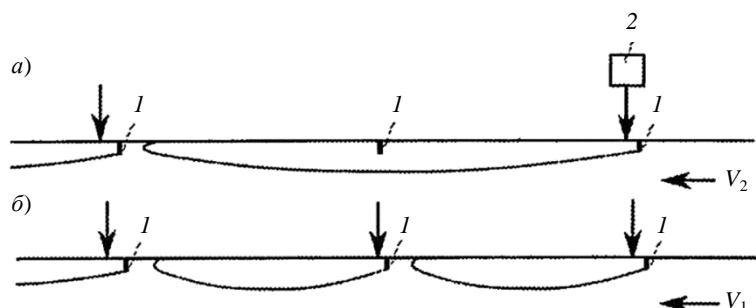
испытания баржи и морского транспортного судна [15, 17, 18], разработаны проекты системы для ряда речных и морских судов [19, 20]. Вид системы образования каверн DACS, установленной на днище мо-

дели пассажирского судна, приведен на рис. 6. На рис. 7 показано днище натурального судна с элементами системы DACS. Фотографии, иллюстрирующие работу DACS в кавитационной трубе и опытовом бассейне, представлены на рис. 8 и 9 (см. вклейку).

Поскольку актуальны условия, чтобы система образования каверн легко монтировалась на днище судна во время планового ремонта и ее установка не требовала изменения исходного корпуса, необходимо стремиться к минимизации размеров элементов, формирующих кавернообразующие ячейки. Ниже приведен анализ необходимых размеров элементов системы кавернообразования, выполненный на базе опубликованных данных.

**Передний кавитатор.** В различных работах в качестве переднего кавитатора применялись разные решения. В России всегда использовался наклонный клин. Высота переднего кавитатора, испытанного в натуральных условиях [5] (табл. 1), составляла 50 мм. В системе DACS использовались вертикально установленные пластины, высота которых в масштабе природы варьировалась в пределах от 2,5 до 25 мм. На рис. 6 высоту кавитатора натурального судна можно оценить в 15–20 % высоты продольных килей, которая в публикациях была определена в 15 см, т.е. в натуральных условиях высота кавитатора не превышала 20–25 мм. При испытаниях по исследованию похожей схемы создания каверн в кавитационной трубе Тасманийского университета (Австралия) [22–25] высота вертикального кавитатора принималась 10 мм.

Отметим, что расстояние между кавитаторами должно выбираться в зависимости от скорости. На рис. 10 приведена схема формирования каверн DACS, когда судно имеет две эксплуатационные скорости:  $V_1$  и  $V_2$  ( $V_1$  существенно меньше  $V_2$ ). На плоском днище установлены кавитаторы 1, к которым от источника воздуха 2 подается воздух. На меньшей скорости каверны формируются за всеми кавитаторами, а при увеличении скорости происходит рост длины каверны, после чего каж-



**Рис. 10.** Схема последовательно расположенных воздушных каверн на днище судна [26]. Движение судна слева направо

**Fig. 10.** Layout of consecutive bottom air cavities [26]. The ship moves from left to right

дый второй кавитатор оказывается покрытым воздухом и больше не принимает участия в формировании каверн. Этот эффект отмечался в Крыловском центре при исследованиях каверн с волновым профилем (рис. 5), где промежуточные кавитаторы рассматривались как вспомогательные для начальной стадии образования единой каверны.

Можно сделать вывод, что при исследованиях в обеспечение создания системы частичных каверн рассматривались кавитаторы очень небольшой высоты (порядка 10–50 мм), что позволяло сравнительно легко организовать их установку на исходном корпусе судна, а также не должно было приводить к существенному увеличению сопротивления системы при отсутствии подачи воздуха.

Для сравнения отметим, что в китайском патенте [27] предлагается в качестве кавитатора применять дефлекторы высотой не более 10 мм, образуемые изогнутыми пластинами, причем воздушные слои должны формироваться за дефлекторами, выполняющими наряду с ролью кавитатора роль аппарата, направляющего и формирующего воздушный поток (рис. 11).

**Длина каверны.** В свете тенденции к минимизации высоты кавитатора представляет интерес, какова будет длина каверны при небольших его размерах, что в итоге определяет площадь днища, покрытую каверной. Исследования влияния параметров кавитатора и потока были выполнены при отработке системы DACS на моделях судов в опытном бассейне и в кавитационной трубе Технологического университета в Делфте (Нидерланды) [12, 13]. В ходе испытаний варьировалась высота кавитатора (от 0,5 до 2,0 мм), объем подаваемого воздуха (от 0,24 до 12 л/мин), скорость течения (от 1 до 3 м/с). Исследования проводились как с одиночной каверной, так и с двумя и тремя последовательно расположенными кавернами (рис. 8). В результате была показана принципиальная возможность создания эффективной каверны за вертикальным кавитатором, определена длина устой-

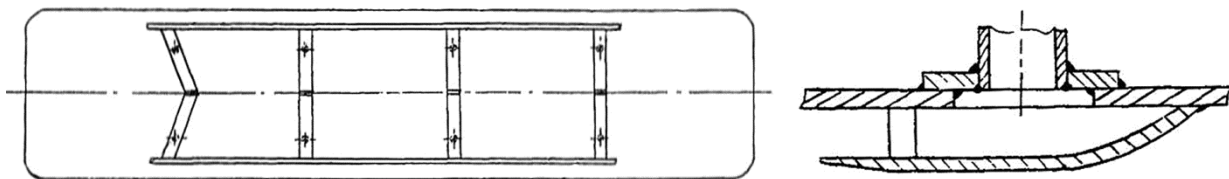
чивой каверны и получены данные по снижению сопротивления.

Согласно результатам проведенных испытаний, максимальная длина устойчивой каверны равна половине длины гравитационной волны на глубокой воде и не зависит от высоты кавитатора. Как известно, длина гравитационной волны  $\lambda = 2\pi V^2/g = 0,64V^2$ , т.е. максимальная длина устойчивой каверны составит  $0,32V^2$  (строго говоря,  $V$  – это фазовая скорость распространения волны, равная скорости потока только в случае, если поток и фронт волны одинаково направлены). Полученная максимальная длина волны хорошо коррелируется с предельной длиной каверны, полученной Бутузовым, которая была равна  $0,34V^2$  [4].

Следует обратить особое внимание на замечание, сделанное в работе [12]. На поверхности каверн всегда образуются мелкие волны (рис. 8). Более мелкие волны связаны с турбулентностью потока, более крупные продольные волны – с рефракцией волн от боковых продольных поверхностей. Поэтому в случае тонких каверн появляется дополнительное ограничение. Вторичные волны на поверхности каверны могут достичь поверхности пластины (корпуса), и каверна разрушится. Это ведет к нестационарному характеру каверны и увеличению потерь воздуха. Как результат, максимальная длина каверны, равная половине гравитационной волны, не может быть достигнута. Это имело место в испытаниях [12] при высоте кавитатора 0,5 мм, и данный эффект следует иметь в виду при стремлении к минимизации высоты кавитаторов.

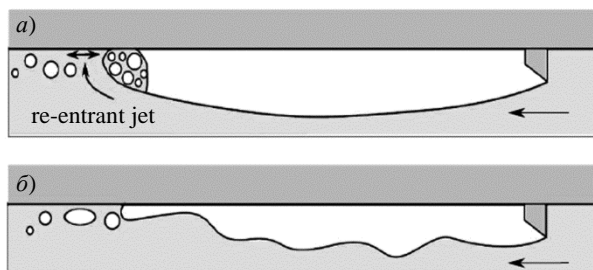
**Оформление замыкания каверны.** Говоря о длине каверны, необходимо обратить внимание на оформление места замыкания каверны. От характера замыкания каверн в существенной степени зависит потеря воздуха из каверны.

В работах [12, 14, 28] выделяют два механизма замыкания каверны, определяющие потери воздуха (рис. 12). Первый и преобладающий механизм – нестационарное разрушение хвоста каверны клас-



**Рис. 11.** Схема энергосберегающего устройства судна с воздушными слоями по патенту [27] и продольный разрез дефлектора. Движение судна слева направо

**Fig. 11.** Layout of air layer-based power-saving device for ship as per Patent [27] and cross-section of deflector. The ship moves from left to right



**Рис. 12.** Два механизма потери воздуха из каверны [14]: а) при разрушении хвоста каверны с образованием обратной струйки; б) при отрыве частиц воды с воздухом за счет волны на свободной поверхности каверны

**Fig. 12.** Two ways of air leakage from cavity [14]: а) deterioration of cavity tail with incipient backtrickle; б) transfer of air in water particles carried away by the wave on the free surface of cavity

сическим для кавитационных явлений путем с образованием обратной струйки. Второй механизм с существенно менее интенсивной потерей воздуха – отрыв частиц воды с воздухом от взволнованной поверхности каверны.

В России при создании системы каверн всегда организовывался кормовой обтекатель для замыкания каверны (рис. 2), образующейся за кавитаторами на корпусе (только каверна за кормовым обтекателем замыкалась на днище). Это позволяло расширить диапазон скоростей эффективного применения каверн, поскольку при замыкании на плоском днище их длина зависит от квадрата скорости. Для последовательности каверн, расположенных одна за другой вниз по потоку, роль замыкающего обтекателя каждой каверны принадлежит следующему кавитатору, представляющему собой наклонную пластину. Отметим, что в материалах DACS, судя по фотографиям на рис. 8 и 9, а также схемам на рис. 10, каверна не доходит до следующего кавитатора, а замыкается на плоском днище.

Нестационарная область замыкания каверн с обратной струйкой исследовалась в ряде работ. На рис. 13 (см. вклейку) представлены картины замыкания каверн в экспериментах на пластине, полученные в рамках упоминавшихся исследований DACS в кавтрубе [14], а также в результате испытаний кавитационных течений с искусственной каверной в кавтрубе Тасманийского университета [22–25]. Схема исследуемого кавитационного течения приведена на рис. 14 (см. вклейку); размеры рабочего участка 0,6×0,6×2,6 м, высота кавитатора – 10 мм, ширина – 156 мм.

Обе фотографии на рис. 13 дают очень близкую картину замыкания каверны без заднего обтекателя. Область каверны ближе к кавитатору визуально заполнена воздухом и имеет четкую поверхность раздела воздух/вода, в то время как в задней части каверны нагнетаемый воздух увлекается в основной поток.

Замыкание каверны демонстрирует поведение возвратной струи, которое соответствует случаю 1 на рис. 4. Область возвратной струи видна как хаотическая область с нарушенной границей раздела воздух/вода. След за каверной представляет собой непрерывный поток пузырьков воздуха, увлекаемых основным потоком. В таких условиях не очень ясно, что корректно называть длиной каверны.

Выше, основываясь на решении Бутузова для обтекания выступа невязким потоком, отмечено, что максимальная длина каверны зависит только от скорости течения. В отечественной практике генеральной линией последнего времени было создание единой каверны (даже когда она организовывалась за счет продольной последовательности кавитаторов). Однако при решении задач, связанных с применением локальных каверн, необходимо принять во внимание факт, отмеченный в [12], что вопрос о влиянии турбулентного пограничного слоя на гидродинамические характеристики тонких каверн остается открытым. С этим влиянием тесно связаны вопросы расхода воздуха для создания и поддержания каверн, определения мощности воздушных систем и суммарных эффектов применения воздушной смазки. С учетом изложенного представляется важным проанализировать исследования, выполненные для вязкой жидкости.

В Университете Тасмании было проведено расчетное исследование потока с искусственной кавитацией в кавитационной трубе (рис. 14) с целью попытаться связать физическое моделирование кавитационного течения с его численным моделированием. Расчеты выполнялись с использованием коммерческого пакета CD Adapco STAR-CCM+ методами компьютерной гидродинамики и методом граничных элементов потенциального течения ВЕМ (Boundary Element Method) [25].

Было исследовано влияние погружения кавитатора в пограничный слой натекающего потока  $\delta/h$  ( $\delta$  – толщина пограничного слоя,  $h$  – высота кавитатора), изменявшегося в пределах от 0 до 10. Поскольку кавитатор был прикреплен к плоской стенке, эти результаты могут быть актуальны для обтекания кавитатора на корпусе судна.

Проблемой при численном прогнозировании характеристик воздушной каверны являлось правильное моделирование ее области замыкания, где разделенный воздушно-водяной поток превращается в более рассеянный поток. Геометрия воздушной каверны, полученная при различных числах кавитации, представлена на рис. 15 (см. вклейку). В расчетах поддерживались постоянными скорость течения ( $V = 10$  м/с) и давление, а число кавитации  $\sigma_c$  изменялось пропорционально объему подаваемого воздуха, который на рисунке указан в виде коэффициента объемного расхода  $C_{Qv} = Q_m / \rho_{air} U_\infty S$ , где  $Q_m$  – массовый расход воздуха;  $\rho_{air}$  – плотность воздуха;  $S$  – эталонная площадь (высота кавитатора, умноженная на единицу ширины). Диапазон расхода воздуха 0,01–0,09 кг/с.

Результаты расчета хорошо коррелируются с рассуждениями о форме каверн на рис. 4. Замыкание каверны на горизонтальной стенке при меньших расходах демонстрирует типичное поведение обратной струйки, при котором струйный поток возвращает жидкость по стенке назад в каверну. Для коротких каверн ( $l_c/h < 50$ ) обратная струйка переносит жидкость почти до кавитатора, большая часть каверны состоит из смеси жидкость/газ. Для более длинных каверн (при большем расходе воздуха) обратная струйка распространяется только на часть каверны, оставляя область входной полости заполненной только воздухом. При этом втекающая в каверну струя из-за действия силы тяжести частично отделяется от стенки в нескольких точках внутри каверны.

Приведенные исследования позволили получить дополнительную информацию по длине каверны при заданных размерах кавитатора. На рис. 16 показана зависимость безразмерной длины каверны  $l_c$  (отношенной к высоте кавитатора  $h$ ) от числа кавитации  $\sigma_c$  для числа Фруда, вычисленного по высоте кавитатора  $h$ , равного 20,1 [22]. Как можно видеть, эта зависимость носит линейный характер, и при определенных условиях измеренная длина каверн может составлять до 60 высот кавитатора.

Достаточно близкие величины для длин каверн (до ~60–80 высот кавитатора) при  $\delta/h \sim 2-4$  демонстрирует рис. 17 (см. вклейку) из расчетной работы [29], где рассматривалась каверна, образованная за уступом. Приведенные графики для длины каверны (относительно высоты уступа) в зависимости от расхода воздуха и соотношения высоты уступа к толщине пограничного слоя  $\delta/h$  демонстрируют также достаточно сильную зависимость соотношения  $l/h$  от числа Рейнольдса потока. На графиках

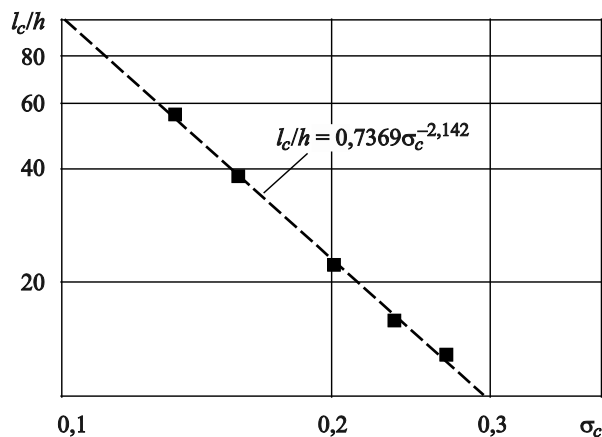


Рис. 16. Безразмерная длина каверны как функция числа кавитации [22]

Fig. 16. Non-dimensional cavity length as function of cavitation number [22]

$C_Q = (m^* / \rho_a) / (hwU_\infty)$ , где  $h$ ,  $w$  – высота и ширина кавитатора;  $m^*$  – массовый расход внутри каверны;  $\rho_a$  – плотность воздуха.

Необходимо также обратить внимание на результат расчетного исследования, выполненного при разработке системы DACS [30] при решении задачи прогнозирования снижения сопротивления воздушными кавернами, которые формируются на горизонтальной пластине за кавитатором с заранее заданной формой и размерами. Вычисления выполнялись для двумерной задачи по CFD программе ReFresco [29–31] с моделью турбулентности  $k\sqrt{(k)L}$  (KSKL) для вязких потоков, которая решает многофазные нестационарные течения несжимаемой жидкости с помощью уравнений RANS, дополненных моделями турбулентности, моделями кавитации и уравнениями переноса объемной доли для различных фаз. Длина и толщина каверны принималась по результатам экспериментов [12, 13]: при скорости течения 1,41 м/с использовался кавитатор высотой 1,5 мм, а длина каверны составляла 0,89 м (~600 высот кавитатора).

Эти расчеты продемонстрировали важное для практики (в частности, для пересчета результатов с модели на натурные условия) физическое явление, которое ранее было исследовано в работах российских специалистов [28]: пограничный слой, образующийся перед кавитатором, исчезает вдоль поверхности каверны, а за каверной происходит образование нового пограничного слоя. На рис. 18 (см. вклейку) по данным [30] показано изменение коэффициента местного трения  $C_f$  перед кавитатором и за каверной. За счет торможения потока коэффи-

коэффициент местного трения снижается до нуля при приближении к кавитатору.

За кавитатором следует зона свободного сдвига вдоль поверхности каверны. Непосредственно после каверны наблюдается область с высоким коэффициентом трения, что указывает на образование нового пограничного слоя. Для сравнения, на рис. 18 коэффициент местного трения при наличии каверны сопоставлен с коэффициентом местного трения для плоской пластины той же длины без каверны (сплошная черная линия). Для рассмотренного случая смачиваемая площадь пластины уменьшилась на 44,5 %, но сопротивление трения на пластине снизилось на 39,4 %, а с учетом сопротивления кавитатора (сопротивления давления) уменьшение сопротивления на пластине с каверной составило 31,3 %.

#### ***Боковые ребра кавернообразующей ячейки.***

Продольные кили должны предотвращать унос воздуха вбок от каверны, так что при правильном проектировании для создания и поддержания каверн требуется относительно небольшое количество воздуха, компенсирующее его утечку из хвоста каверны. Одновременно продольные кили можно использовать в качестве воздухопроводов для обеспечения подвода воздуха к каждому кавитатору. Продольные кили, устанавливаемые ближе к бортам, должны препятствовать уносу воздуха из каверн к борту. Дополнительно, для предотвращения перетекания воздуха с борта на борт, каверны должны быть разделены дополнительными киями на несколько продольных секций (см. фото системы DACS на рис. 6, 7). Ранее в отечественных работах на это обращалось особое внимание, т.к. для любой системы подвода воздуха это важно с точки зрения поперечной остойчивости – в отсутствие дополнительных продольных килей при перетекании воздуха на один борт судно может приобрести крен до 2°, и эффективность устройства при этом существенно снижается.

В системе создания последовательности частичных каверн кавернообразующие ячейки обычно располагаются одна за другой, роль подпорного элемента вниз по потоку может играть следующий кавитатор. При этом для снижения общего расхода воздуха системой воздух, выходящий из первых каверн, должен подпитывать каверны, расположенные вниз по течению. В этом плане правильный выбор высоты бортовых и промежуточных продольных килей, чтобы они предотвращали боковое перетекание воздуха на всей длине участка днища с кавернами, приобретает важную роль для обеспечения общей эффективности системы.

Оптимальная высота боковых килей рассматривалась в нескольких работах. Эксперименты с масштабной моделью, проведенные при разработке системы DACS [12, 13], позволили определить оптимальную высоту продольных килей 15 см в масштабе натурного судна. Эта высота принята как максимальная, необходимая для предотвращения перетекания в носовой каверне, где из-за влияния носовых обводов получена наибольшая толщина каверны.

Таким образом, рассмотрение результатов опубликованных исследований и опыта Крыловского центра применительно к построению каверн позволяет обоснованно определить номенклатуру элементов кавернообразующих ячеек, оценить их размеры и эффект применения рассматриваемой технологии воздушной смазки.

### **3. Проектно-исследовательские проработки и натурные испытания судов с системой искусственных каверн**

#### **3. Research design and full-scale trials of ships with air cavity systems**

В начале 2010-х гг. Крыловский центр совместно с конструкторскими бюро – проектантами судов приступил к исследованиям нового устройства для создания системы искусственных каверн [11]. По принципу действия оно почти аналогично изображенному на рис. 2. Отличие заключается в том, что выступающие за основную плоскость элементы (кили и кавитаторы) выполняются подвижными, чтобы при расчетном режиме движения судна они обеспечивали создание системы каверн, а при необходимости могли складываться на днище.

Были проведены проектно-исследовательские проработки двух судов: сухогруза «река – море» длиной 121 м водоизмещением 5850 т и речного танкера длиной 80 м водоизмещением 2320 т. По результатам пересчета результатов модельных испытаний на натурное судно для сухогруза при грузовой осадке эффект снижения сопротивления составил 14 %, для речного танкера – 16 %.

Практически единственным примером современных проработок, доведенных до натуральных испытаний, являются проектные проработки судов на воздушной каверне, выполненные по программе DACS. В ходе программы были выполнены проектные проработки и модельные испытания в опытовом бассейне для трех судов компании Damen: речного лайнера для внутренних водных путей [15],

речного круизного судна [16] и морского пассажирского судна [16].

В табл. 2 приведены основные характеристики судов, ожидаемые величины снижения сопротивления и мощности (с учетом энергетических затрат на подачу воздуха). Результаты позволяют дополнительно оценить элементы системы для образования частичных каверн.

**На модели речного лайнера** было установлено 11 кавитаторов с подводом воздуха к каждому из них и 2 скега (продольных кия), ограничивавших каверны только по бокам. Высота скегов 22 мм, длина 5,5 м. Кавитаторы имели высоту 1,5 и 2,5 мм, ширину 765 мм, продольное расстояние между кавитаторами составляло 500 мм. Согласно расчетам, при скоростях ниже 1,2 м/с в образовании каверны участвовали все кавитаторы, при скоростях 1,20–1,75 м/с длины каверн прогнозировались в диапазоне 0,5–1,0 м, так что в формировании каверн участвовали нечетные (через один) кавитаторы. На скоростях 1,75–1,90 м/с не участвовали в образовании каверны два из каждых трех кавитаторов. Из-за влияния носовой оконечности толщина носовой каверны была намного больше прогнозируемой, так что воздух стравливался из каверны по бокам через скеги, что ограничивало рост длины носовой каверны. Таким образом, высота бокового скега должна учитывать весь диапазон возможных изменений толщины каверны на различных скоростях. Испытания показали, что коэффициент эффективности (соотношение полученного снижения сопротивления и максимально возможного сниже-

ния при одинаковой изолируемой площади применения каверн) составил 0,7.

**На модели речного круизного судна** установлено 4 кия по 11 кавитаторов в каждой секции между ними. Испытания модели проводились с вариацией глубины воды  $H$  и показали, что при относительной глубине  $H/T = 2,9$  ( $T$  – осадка судна) и  $F_n = 0,12$ – $0,14$  величина эффекта составила 8–14 %. А при уменьшении глубины до  $H/T = 1,6$  и снижении скорости до  $F_n = 0,10$  эффект увеличился почти до 18 %.

**На модели морского пассажирского судна** установлено 6 килей, некоторые из которых выполнены разрезными со смещением по ширине судна, таким образом, чтобы секции каверны имели разную ширину (рис. 6). Компоновка системы была оптимизирована для получения максимальной площади днища, покрытого воздухом.

Наиболее ценную информацию при внедрении инновационных решений приносят натурные испытания. Выше уже описаны результаты проведенных в СССР натурных испытаний трех судов. К сожалению, полученные положительные результаты по снижению сопротивления не закончились серийным внедрением систем подвода воздуха: вначале из-за чрезвычайно низких цен на топливо, а потом из-за сложной экономической обстановки в стране.

Работоспособность разработанной системы образования частичных каверн DACS была проверена в реальных условиях эксплуатации на натурном плоскодонном понтоне, толкаемом на реке буксиром-

**Таблица 2.** Основные характеристики судов с DACS

**Table 2.** Main parameters of ships with DACS

	Речной лайнер Damen	Речное круизное судно	Морское пассажирское судно
Длина $L_{PP}/L_{OA}$ , м	$L_{PP} = 110$	$L_{OA} = 135$	$L_{OA} = 165$
Ширина, м	11,4	17,5	21
Проектная осадка, м	2,6	1,7	5
Площадь плоского днища, м <sup>2</sup>	1649,6	1380	830
Исследуемый диапазон чисел Фруда	0,12–0,21	0,12–0,14	0,14–0,22
Тип движителя	два винта	–	два POD
Уменьшение общей смачиваемой площади, %	28–39	ок. 30	15
Снижение сопротивления, %	8–12	–	6,0–7,2
Снижение мощности с учетом затрат на подачу воздуха, %	–	до 18	4,5–5,1
Затраты мощности на подачу воздуха, кВт	–	10	100



**Рис. 19.** Понтон [15] и морское грузовое судно Danita [17] с системами подвода воздуха  
**Fig. 19.** Pontoon [15] and Danita sea-going cargo ship [17] with air feed systems

толкачом (рис. 19). Испытания подтвердили, что в натуральных условиях устойчивые каверны могут быть созданы и поддерживаться в течение длительного времени [15].

В 2023 г. Damen Shipyards Group совместно с Делфтским технологическим университетом оснастили системой DACS морское грузовое судно Danita [17]. Длина судна равна 115,5 м, ширина – 16,5 м, осадка – 6,05 м, дедвейт – 6405 т. На днище были установлены продольные кили и поперечные кавитаторы, служащие для формирования системы воздушных каверн (рис. 7, 19), а также установлено 4 воздушных компрессора и проложены воздухопроводы с запорно-переключающей арматурой. По данным натуральных испытаний, применение на судне системы DACS позволило снизить расход топлива на 7 %.

## Заключение

### Conclusion

Проведенный анализ позволяет рассматривать системы создания частичных каверн на днище судна как наиболее перспективные устройства для снижения сопротивления и улучшения характеристик энергоэффективности судов, установка которых возможна без изменения исходных обводов корпуса в ходе текущих ремонтов.

Данные опубликованных исследований и проработок подтвердили результаты, ранее полученные советскими исследователями, работавшими в области применения воздушной смазки для снижения сопротивления воды движения судов. В частности:

1. Наибольшее относительное энергосбережение судов с системой частичных каверн может быть достигнуто на судах внутреннего плавания, имеющих ограниченную осадку, относительно

большую площадь плоского днища и скорости, соответствующие низким числам Фруда, при которых сопротивление трения является доминирующим. С увеличением скорости (числа Фруда по длине корпуса) относительное снижение мощности уменьшается, т.к. составляющая силы трения становится меньше в общем балансе сил сопротивления. Эффект применения системы частичных каверн, не требующей изменения исходных обводов корпуса, по разным источникам может составлять 7–15 % снижения сопротивления.

2. Длину одной каверны в составе системы каверн можно оценить соотношением  $l(m) = 0,34V^2$ , где  $V$  – скорость судна в м/с.
3. Продольное расстояние между кавернами подбирается экспериментально для эксплуатационной скорости хода, используя данные о предельной длине каверны. При этом система каверн должна быть устойчива (без негативного взаимного влияния каверн друг на друга) для получения максимального эффекта снижения сопротивления.
4. Для повышения поперечной остойчивости судна и предотвращения перетекания воздуха с борта на борт необходимо, кроме ограничительных боковых килей, устанавливать на днище несколько дополнительных промежуточных килей.
5. Эффект частичных каверн зависит от скорости судна и глубины воды. Дифферент судна приводит к снижению эффективности системы.
6. Система подачи воздуха должна обеспечивать требуемый объем воздуха на короткий период формирования каверны, а далее, для компенсации утечки воздуха из каверн, должен обеспечиваться меньший объем, только для поддержания утечек из каверны.

## Список использованной литературы

1. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Ч. 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. Пустошный А.В., Сверчков А.В., Новиков Д.О. Использование подвода пузырьков воздуха к корпусу для улучшения энергоэффективности судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2026. Вып. 1(415). С. 17–36.
3. 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.
4. Гидродинамические характеристики судна с искусственной каверной при движении по ограниченному фарватеру / М.В. Галушина, А.В. Сверчков, И.А. Чичерин [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1(391). С. 11–28. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-11-28.
5. 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.
6. Бутузов А.А. Влияние весомости жидкости на кавитационное течение за телом, расположенным на нижней поверхности бесконечной горизонтальной стенки // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1965. Вып. 218: Сборник статей по гидродинамике судна. С. 84–99.
7. Бутузов А.А. О предельных параметрах искусственной каверны, образуемой на нижней поверхности горизонтальной стенки // Известия АН СССР. Серия: Механика жидкости и газа. 1966. № 2. С. 167–170.
8. Matveev K. Air cavity ships are ready for a wider market // Speed at Sea. 2003. Vol. 9, No. 1. P. 13–16.
9. Ship hull drag reduction using bottom air injection / A. Fakhraee, M. Rad, H. Amini, M. Rishehri // Proceedings of the 26<sup>th</sup> International conference on offshore mechanics and arctic engineering (OMAЕ 2007). San Diego, 2007. Vol. 4. P. 283–292. DOI: 10.1115/OMAЕ2007-29020.
10. Air cavity vessel with wedge-shaped cavities, longitudinally offset cavities, and roll control means and method for constructing the same : int. patent 03095297 WIPO / Matveev K.I., Winkler J. № PCT/NL2003/000326; appl. 05.05.2003; publ. 20.11.2003. 19 p.
11. 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.
12. Experimental study on developed air cavities under a horizontal flat plate / O. Zverkhovskiy, R. Delfos, T. van Terwisga, J. Westerweel // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International symposium on cavitation (CAV2012). Singapore : Research Publishing Services, 2012. P. 234. DOI: 10.3850/978-981-07-2826-7\_234.
13. Flat plate drag reduction by air cavities / O. Zverkhovskiy, R. Delfos, J. Westerweel, T. van Terwisga // 3<sup>rd</sup> International conference on advanced model measurement technologies for the maritime industry (AMT'13) : Proceedings. [Newcastle : s.l.], 2013. P. 364–368.
14. Zverkhovskiy O. Ship drag reduction by air cavities : PhD Thesis. Delft University, 2014.
15. Zverkhovskiy O., Jong J.S. de. Damen air cavity system for sustainable passenger ships // Proceedings of International conference sustainable and safe passenger ships. London : Royal Institution of Naval Architects, 2020. P. 65–70.
16. Experimental study on drag reduction by air cavities on a ship model / O. Zverkhovskiy, T. van Terwisga, M. Günsing [et al.] // Proceedings of 30<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics. [Washington], 2014. P. 1–8.
17. Danita // VesselFinder : [site]. URL: <https://www.vessel-finder.com/ru/vessels/details/9341108> (Accessed: 26.03.2026).
18. Tallinn Shipyard has installed a unique air lubrication system on an Amisco vessel / BLRT Repair Yards : [site]. 2023. July 20. URL: <https://blrtyards.com/en/news-list/tallinn-shipyard-has-installed-a-unique-air-lubrication-system-on-an-amisco-vessel/> (Accessed: 26.03.2026).
19. Dela Cruz N.E. Damen develops innovative add-on technology to reduce hull resistance // Baird Maritime : [site]. 2020. Sept. 22. URL: <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/passenger-vessel-world/ro-pax/interview-damen-develops-innovative-add-on-technology-to-reduce-hull-resistance/> (Accessed: 26.03.2026).
20. Moore R. Damen Air Cavity System cuts fuel consumption for cruise ships // Riviera Maritime : [site]. 2020. Mar. 13. URL: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/damen-air-cavity-system-cuts-fuel-consumption-on-ocean-cruise-ships-58531> (Accessed: 26.03.2026).
21. Damen air cavity system (DACS) // Damen : [site]. Gorinchem, 2026. URL: <https://www.damen.com/equipment/green-solutions/damen-air-cavity-system> (Accessed: 26.03.2026).

22. *Barbaca L., Pearce B.W., Brandner P.A.* Experimental investigation of ventilated cavity flow over a 3D wall mounted fence // Proceedings of 16<sup>th</sup> International Symposium on transport phenomena and dynamics of rotating machinery. Honolulu, 2016. P. 1–7. URL: <https://hal.science/hal-01521586v1> (Accessed: 26.03.2026).
23. *Barbaca L., Pearce B.W., Brandner P.A.* Experimental study of ventilated cavity flow over a 3-D wall-mounted fence // International Journal of Multiphase Flow. 2017. Vol. 97. P. 10–22. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.07.015.
24. On the unsteady behaviour of cavity flow over a two-dimensional wall-mounted fence / *Barbaca L., Pearce B.W., Ganesh H.* [et al.] // Journal of Fluid Mech. 2019. Vol. 874. P. 483–525. DOI: 10.1017/jfm.2019.455.
25. *Barbaca L., Pearce B.W., Brandner P.A.* Numerical analysis of ventilated cavity flow over a 2-D wall mounted fence // Ocean Engineering. 2017. Vol. 141. P. 143–153. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.06.018.
26. Плоскодонное судно и способ управления длиной по меньшей мере одной воздушной полости : патент 2664137 Рос. Федерация / *Уэстериулл Д., Тервисга Т.Я.К. ван, Зверковский О.* № 2016123079; заявл. 25.11.2014; опубл. 15.08.2018, Бюл. № 23. 19 с.
27. Energy saving apparatus for ship by air layers reducing resistance : pat. 85101991 China. № 198585101991; appl. 01.04.1985; publ. 02.09.1987. 8 p.
28. *Громов П.С., Короткин А.И.* О сопротивлении и пограничном слое судов с воздушными пленками на днище // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1974. Вып. 279. С. 75–88.
29. *Pearce B.W., Brandner P.A., Foster S.J.* Ventilated Cavity flow over backward – facing step // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 656. P. 012164. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012164.
30. Numerical study on air cavity flows / *O. Zverkhovskiy, M. Kerkvliet, A. Lampe* [et al.] // Proceedings of 18<sup>th</sup> Numerical towing tank symposium (NuTTS 2015). Red Hook : Curran, 2015. P. 1–6.
31. Versatile solver, tailored for maritime challenges : [ReFresco] // Marin : [site]. Wageningen, 2019. URL: <http://www.refresco.org> (Accessed: 30.03.2026).
32. *Vaz G., Jaouen F., Hoekstra M.* Free-surface viscous flow computations: Validation of URANS code FreSCo // Proceedings of 28<sup>th</sup> International conference on ocean, offshore and arctic engineering (OMAE 2009). Honolulu, 2009. Vol. 5. P. 425–437. DOI: 10.1115/OMAE2009-79398.
- wards 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 // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 4(402). P. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156 (*in Russian*).
2. *Pustoshny A.V., Sverchkov A.V., Novikov D.O.* Bubble lubrication of hull for power efficiency improvement of ships // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026. Vol. 1(415). P. 17–36 (*in Russian*).
3. *Sverchkov A.V.* Artificial cavities for drag reduction of ships // Compendium of papers to commemorate 150<sup>th</sup> anniversary of Academician A.N. Krylov. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2013. P. 65–82 (*in Russian*).
4. Hydrodynamic parameters of air-cavity ship in a narrow fairway / *M.V. Galushina, A.V. Sverchkov, I.A. Chicherin* [et al.]. // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020. Vol. 1(391). P. 11–28. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-391-11-28 (*in Russian*).
5. *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*).
6. *Butuzov A.A.* Effect of fluid weight upon cavitating flow behind the body on the lower surface of infinite horizontal wall // Transactions of the Krylov Central Research Institute, 1965. Vol. 218: Compendium of papers on ship hydrodynamics. P. 84–99 (*in Russian*).
7. *Butuzov A.A.* On limit parameters of artificial cavity on the lower surface of infinite horizontal wall // Izvestiya of USSR Academy of Sciences. Series: Fluid and Gas Dynamics. 1966. No. 2. P. 167–170 (*in Russian*).
8. *Matveev K.* Air cavity ships are ready for a wider market // Speed at Sea. 2003. Vol. 9, No. 1. P. 13–16.
9. Ship hull drag reduction using bottom air injection / *A. Fakhraee, M. Rad, H. Amini, M. Rishchri* // Proceedings of the 26<sup>th</sup> International conference on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE 2007). San Diego, 2007. Vol. 4. P. 283–292. DOI: 10.1115/OMAE2007-29020.
10. Air cavity vessel with wedge-shaped cavities, longitudinally offset cavities, and roll control means and method for constructing the same : int. patent 03095297 WIPO / *Matveev K.I., Winkler J.* № PCT/NL2003/000326; appl. 05.05.2003; publ. 20.11.2003. 19 p.
11. *Sverchkov A.V., Pustoshny A.V., Gorbachev Yu.N.* Experimental research and design studies on the use of air caverns on mixed navigation vessels // Transactions of the Krylov Central Research Institute. 2012. Vol. 69(353). P. 23–38 (*in Russian*).

## References

1. *Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V.* Novelties in the international policy to-

12. Experimental study on developed air cavities under a horizontal flat plate / *O. Zverkhovskiy, R. Delfos, T. van Terwisga, J. Westerweel* // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International symposium on cavitation (CAV2012). Singapore : Research Publishing Services, 2012. P. 234. DOI: 10.3850/978-981-07-2826-7\_234.
13. Flat plate drag reduction by air cavities / *O. Zverkhovskiy, R. Delfos, J. Westerweel, T. van Terwisga* // 3<sup>rd</sup> International conference on advanced model measurement technologies for the maritime industry (AMT'13) : Proceedings. [Newcastle : s.l.], 2013. P. 364–368.
14. *Zverkhovskiy O.* Ship drag reduction by air cavities : PhD Thesis. Delft University, 2014.
15. *Zverkhovskiy O., Jong J.S. de.* Damen air cavity system for sustainable passenger ships // Proceedings of International conference sustainable and safe passenger ships. London : Royal Institution of Naval Architects, 2020. P. 65–70.
16. Experimental study on drag reduction by air cavities on a ship model / *O. Zverkhovskiy, T. van Terwisga, M. Gunging* [et al.] // Proceedings of 30<sup>th</sup> Symposium on Naval Hydrodynamics. [Washington], 2014. P. 1–8.
17. Danita // VesselFinder : [site]. URL: <https://www.vessel-finder.com/ru/vessels/details/9341108> (Accessed: 26.03.2026).
18. Tallinn Shipyard has installed a unique air lubrication system on an Amisco vessel / BLRT Repair Yards : [site]. 2023. July 20. URL: <https://blrtyards.com/en/news-list/tallinn-shipyard-has-installed-a-unique-air-lubrication-system-on-an-amisco-vessel/> (Accessed: 26.03.2026).
19. *Dela Cruz N.E.* Damen develops innovative add-on technology to reduce hull resistance // Baird Maritime : [site]. 2020. Sept. 22. URL: <https://www.bairdmaritime.com/work-boat-world/passenger-vessel-world/ro-pax/interview-damen-develops-innovative-add-on-technology-to-reduce-hull-resistance/> (Accessed: 26.03.2026).
20. *Moore R.* Damen Air Cavity System cuts fuel consumption for cruise ships // Riviera Maritime : [site]. 2020. Mar. 13. URL: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/damen-air-cavity-system-cuts-fuel-consumption-on-ocean-cruise-shipsnbsp-58531> (Accessed: 26.03.2026).
21. Damen air cavity system (DACS) // Damen : [site]. Gorinchem, 2026. URL: <https://www.damen.com/equipment/green-solutions/damen-air-cavity-system> (Accessed: 26.03.2026).
22. *Barbaca L., Pearce B.W., Brandner P.A.* Experimental investigation of ventilated cavity flow over a 3D wall mounted fence // Proceedings of 16<sup>th</sup> International Symposium on transport phenomena and dynamics of rotating machinery. Honolulu, 2016. P. 1–7. URL: <https://hal.science/hal-01521586v1> (Accessed: 26.03.2026).
23. *Barbaca L., Pearce B.W., Brandner P.A.* Experimental study of ventilated cavity flow over a 3-D wall-mounted fence // International Journal of Multiphase Flow. 2017. Vol. 97. P. 10–22. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.07.015.
24. On the unsteady behaviour of cavity flow over a two-dimensional wall-mounted fence / *Barbaca L., Pearce B.W., Ganesh H.* [et al.] // Journal of Fluid Mech. 2019. Vol. 874. P. 483–525. DOI: 10.1017/jfm.2019.455.
25. *Barbaca L., Pearce B.W., Brandner P.A.* Numerical analysis of ventilated cavity flow over a 2-D wall mounted fence // Ocean Engineering. 2017. Vol. 141. P. 143–153. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.06.018.
26. Flat-bottom ship and length management method for at least one air cavity. Russian Federation Patent No. 2664137 / *Westerwill D., Tervisga T., Wang Ya.K., Zverkovsky O.* No. 2016123079; appl. date 25.11.2014; publ. date 15.08.2018, Bulletin No. 23. 19 p. (*in Russian*).
27. Energy saving apparatus for ship by air layers reducing resistance : pat. 85101991 China. № 198585101991; appl. 01.04.1985; publ. 02.09.1987. 8 p.
28. *Gromov R.S., Korotkin A.I.* Resistance and boundary layer of ships with bottom air films // Transactions of the Krylov Central Research Institute. 1974. Vol. 279. P. 75–88 (*in Russian*).
29. *Pearce B.W., Brandner P.A., Foster S.J.* Ventilated Cavity flow over backward – facing step // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 656. P. 012164. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012164.
30. Numerical study on air cavity flows / *O. Zverkhovskiy, M. Kerkvliet, A. Lampe* [et al.] // Proceedings of 18<sup>th</sup> Numerical towing tank symposium (NuTTS 2015). Red Hook : Curran, 2015. P. 1–6.
31. Versatile solver, tailored for maritime challenges : [ReFRESCO] // Marin : [site]. Wageningen, 2019. URL: <http://www.refresco.org> (Accessed: 30.03.2026).
32. *Vaz G., Jaouen F., Hoekstra M.* Free-surface viscous flow computations: Validation of URANS code FreSCO // Proceedings of 28<sup>th</sup> International conference on ocean, offshore and arctic engineering (OMAE 2009). Honolulu, 2009. Vol. 5. P. 425–437. DOI: 10.1115/OMAE2009-79398.

---

#### 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](mailto: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>.

*Новиков Дмитрий Олегович*, генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0009-0009-8495-8331>.

#### **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](mailto: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, Moskovskoye 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>.

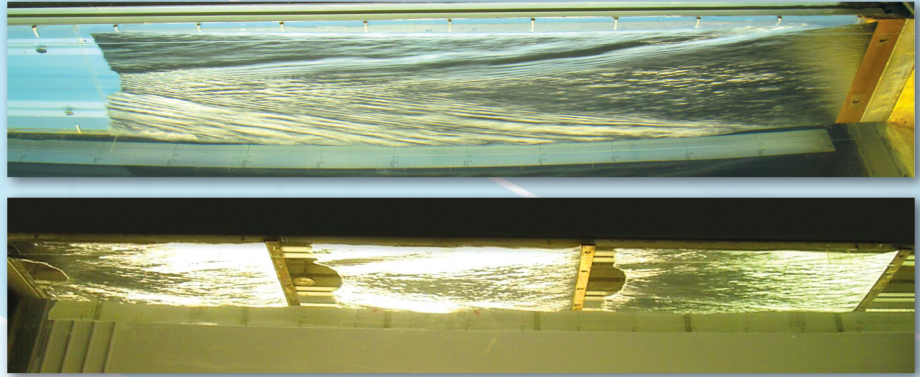
*Dmitry O. Novikov*, Director General, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0009-0009-8495-8331>.

Поступила / Received: 12.03.26

Принята в печать / Accepted: 12.05.26

© Пустошный А.В., Сверчков А.В., Новиков Д.О., 2026

**Рис. 8.** Одиночная каверна [14] и система из трех искусственных каверн [21] в кавитационной трубе (вид снизу). Скорость 1,5 м/с, высота кавитатора 1 мм

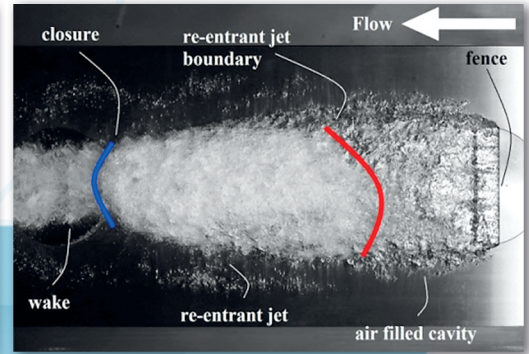
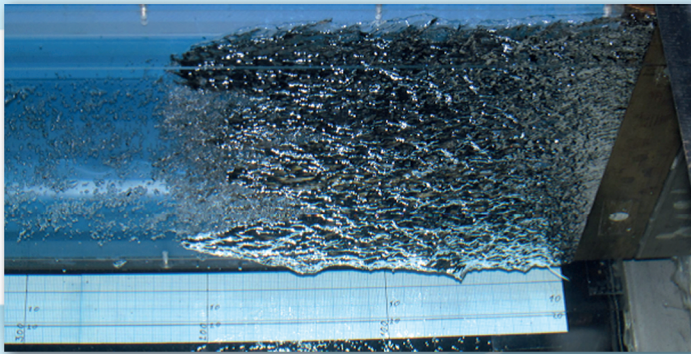


**Fig. 8.** Solitary cavity [14] and a system of three artificial cavities [21] in the cavitation tunnel (bottom view). Speed 1.5 m/s, cavitator height 1 mm

**Рис. 9.** Вид из-под воды в опытном бассейне работы системы DACS [15]. Темные пятна – воздушные каверны. Модель движется слева направо

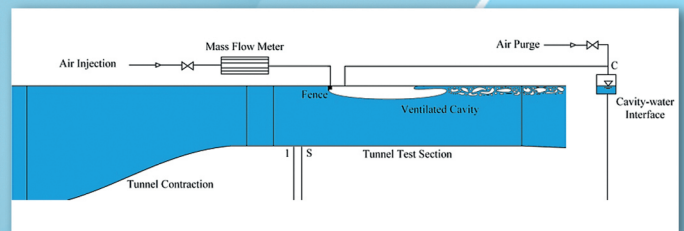
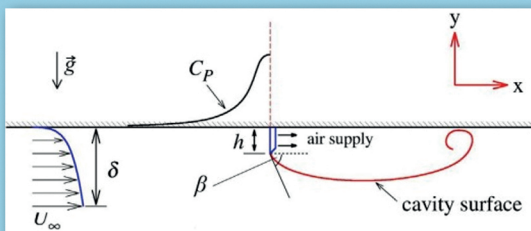


**Fig. 9.** Bottom view of DACS system in operation at the towing tank [15]. Air cavities are seen as dark spots. The model moves from left to right



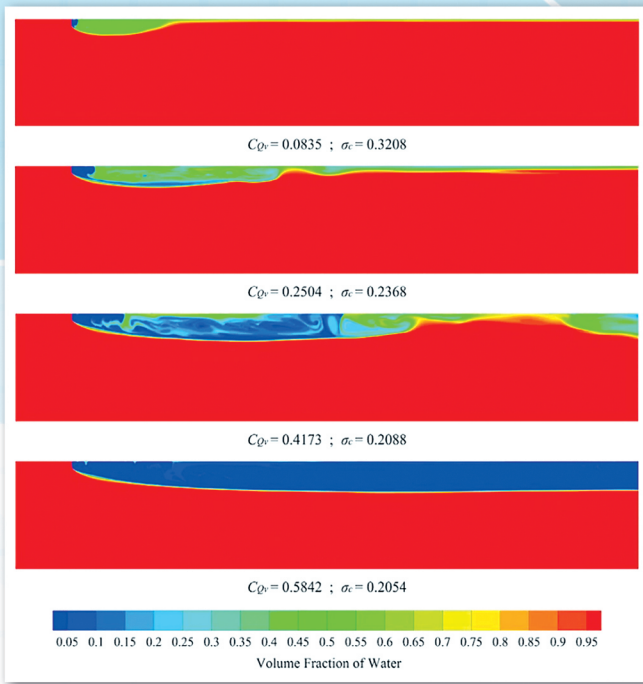
**Рис. 13.** Картина развитой каверны. Потери воздуха обусловлены в основном разрушением хвоста каверны с образованием обратной струйки. Фото [14] (слева) и [22] (справа)

**Fig. 13.** A view of developed air cavity. Air losses are mostly due to backtrickling from deteriorating tail. Photo [14] (left) and [22] (right)



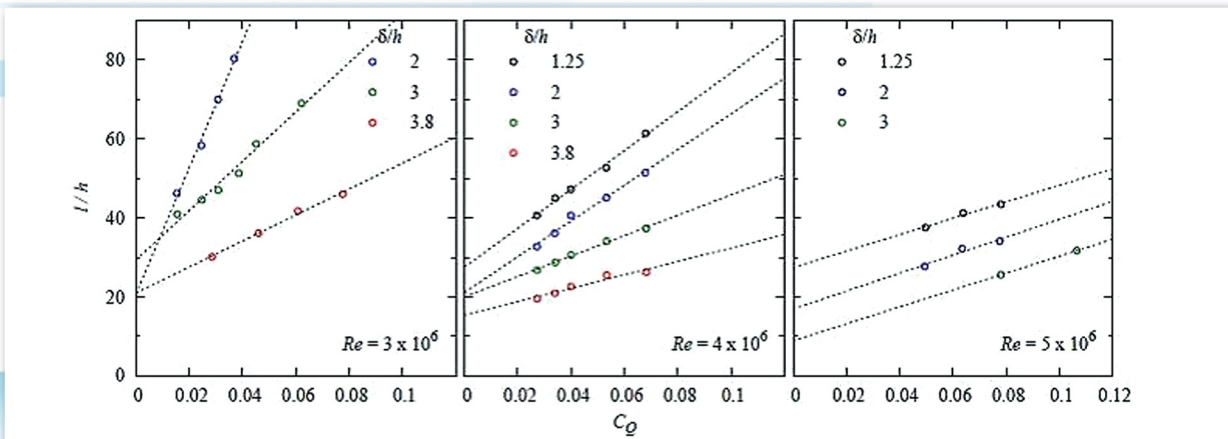
**Рис. 14.** Параметры кавитационного течения с вертикальной пластиной-кавитатором (слева) и схема эксперимента в кавитационной трубе Тасманийского университета (справа) [24]

**Fig. 14.** Parameters of cavitating flow with vertical cavitator plate (left) and setup of cavitation tunnel test at the University of Tasmania, UTAS (right) [24]



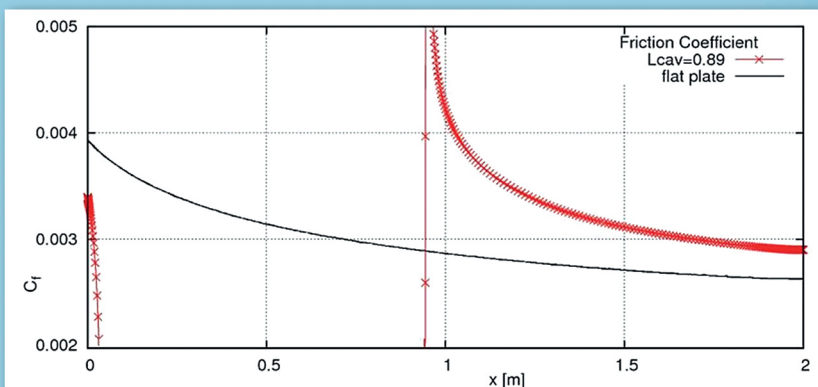
**Рис. 15.** Контуры воздушной каверны при различных числах кавитации [25]

**Fig. 15.** Air cavity shape at different cavitation numbers [25]



**Рис. 17.** Относительная длина каверны  $l/h$  в зависимости от количества подводимого воздуха  $C_{qv}$ , соотношения толщины пограничного слоя к высоте кавитатора  $\delta/h$  и числа Рейнольдса  $Re$ , вычисленного по высоте рабочего участка трубы [29]

**Fig. 17.** Relative cavity length  $l/h$  depending on air feed amount  $C_{qv}$ , ratio between boundary layer and cavitator height  $\delta/h$  and Reynolds number  $Re$  as calculated with respect to the test section height of the cavitation tunnel [29]



**Рис. 18.** Распределение коэффициента местного трения на плоской пластине с каверной (красные линии) и без каверны (черная линия) [30]. Направление течения слева направо

**Fig. 18.** Distribution of local friction coefficient on flat plate with cavity (red lines) and without cavity (black line) [30]. Flow direction: left to right