

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-20-31  
УДК 629.5.015.2

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

## ИСКУССТВЕННАЯ КАВЕРНА КАК СРЕДСТВО СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДОВ

**Объект и цель работы.** В работе представлены результаты научных исследований по применению искусственных каверн на транспортных судах и скоростных катерах для снижения сопротивления, выполненных в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» за последнее десятилетие.

**Материалы и методы.** Приводятся результаты модельных испытаний различных типов судов в глубоководном, мелководном, мореходном и ледовом бассейнах, а также технические решения по использованию искусственной каверны и средств автоматизации при создании каверн в днищевом рецессе.

**Основные результаты.** Рассмотрены особенности применения каверн на судне смешанного «река-море» плавания с экстремально высоким коэффициентом общей полноты и на морском сухогрузном судне с повышенным коэффициентом общей полноты. Приведены результаты испытаний модели Балтик-Макс-танкера с каверной в ледовом бассейне. Показаны возможности эффективного применения каверн на быстроходных водоизмещающих судах. Сообщается о разработке автоматизированной системы создания искусственных каверн. Дается краткий анализ результатов самоходных испытаний моделей транспортных судов по влиянию каверн на пропульсивные характеристики гребных винтов. Приводится обзор последних исследований по применению каверн на глиссирующих катерах.

**Заключение.** Для судов, имеющих сверхполные обводы, была подтверждена гипотеза о влиянии искусственной каверны на снижение зоны отрыва пограничного слоя в кормовой оконечности и улучшение условий работы гребного винта. Приводится также эффективный вариант устройства защиты гребного винта от попадания воздуха из каверны. Комплексными экспериментальными исследованиями подтверждена эффективность применения искусственной каверны на судах ледовых классов, в том числе в части возможности снижения ледового сопротивления. Для быстроходных водоизмещающих судов определена наиболее эффективная трапециевидная форма днищевых рецессов для создания искусственной каверны, отличная от ранее исследованных проектов транспортных судов.

**Ключевые слова:** искусственная каверна, судно смешанного «река-море» плавания, днищевой рецесс, испытания моделей.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-20-31  
UDC 629.5.015.2

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

## ARTIFICIAL CAVITY AS A TOOL FOR REDUCTION SHIP RESISTANCE

**Object and purpose of research.** This paper presents the results of KSRC studies performed in the last decade on application of artificial cavities aboard carrier ships and fast boats to reduce their resistance.

**Materials and methods.** This paper gives model test data for ships of various types, obtained in deep-water, shallow-water, seakeeping and ice basins of Krylov State Research Centre, as well as suggests technical solutions on application of artificial cavity and corresponding automation equipment serving to generate air cavity in the bottom recess.

**Main results.** This paper describes peculiarities of air cavity application aboard mixed navigation (river-sea) vessels with extremely high block coefficients, as well as aboard a sea-going carrier ship with increased block coefficient. It gives ice test data for the model of a BalticMax tanker. It has been shown how air cavities can be efficiently applied on fast displacement

*Для цитирования:* Сверчков А.В., Борусевич В.О. Искусственная каверна как средство снижения сопротивления судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 20–31.

*For citations:* Sverchkov A., Borusevich V. Artificial cavity as a tool for reduction ship resistance. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 20–31 (in Russian).

ships. The paper also discusses newly developed automated system for artificial cavity generation and briefly analyses the results of self-propulsion tests performed on models of carrier ships to understand the effect of air cavity upon propulsion performance of their propellers. The paper also reviews recent studies on air cavity application aboard gliding boats.

**Conclusion.** The study confirmed the hypothesis that artificial cavity applied on ships with very ample lines contributes to reduction of boundary layer separation area in their aft part and improves operational conditions of their propellers. The paper also suggests an efficient design of the device protecting the propeller against air penetrations from the cavity. Comprehensive experimental studies have confirmed the efficiency of artificial cavity application aboard ice-class ships, including its potential in ice resistance reduction. It has been found that for fast carrier ships the most efficient shape of the bottom recess for the air cavity generation will be trapezoid, which makes it different from previously studied designs of carrier ships.

**Keywords:** artificial cavity, mixed navigation (river-sea) vessel, bottom recess, model tests.

*Authors declare lack of the possible conflicts of interests.*

## Введение

### Introduction

Снижение сопротивления судов является одной из определяющих задач Крыловского центра с момента его основания. Высказанные впервые во времена А.Н. Крылова идеи использования для этой цели воздушной смазки нашли применение и получили техническое воплощение в 60-х гг. прошлого века. На протяжении уже более 50 лет в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» ведутся работы по совершенствованию и практическому использованию технологии искусственных каверн на днище судов [8, 9].

В последнее десятилетие эти работы продолжились как для тихоходных транспортных судов, так и для скоростных глиссирующих катеров. Каждый из исследуемых проектов был не просто новым объектом, на котором создавалась искусственная каверна, но обладал каким-то индивидуальным отличительным качеством, позволяющим получить новые научные знания и расширить область применения искусственных каверн.

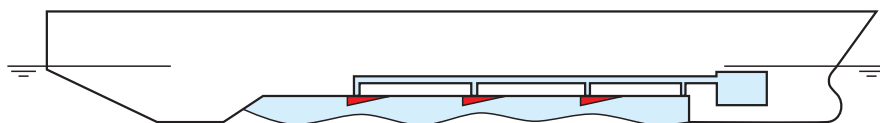
Схема транспортного судна с воздушной каверной приведена на рис. 1. Каверна создается в днищевом рецессе (нише). Ее поверхность имеет волновой профиль, который формируется во время движения судна. Применение каверны на транспортных судах позволяет уменьшить их буксировочное сопротивление на 17–27 %.

За последнее десятилетие были проведены испытания моделей с кавернами следующих транспортных судов:

- суда смешанного «река-море» плавания проектов 81310, 2810 и Р32.3 с автоматизированной системой создания каверн;

**Рис. 1.** Схема формирования воздушной каверны на днище транспортного судна

**Fig. 1.** Layout of air cavity generation on the bottom of carrier ship



- сухогруз смешанного «река-море» плавания пр. 15170 с экстремально высоким коэффициентом общей полноты;
- универсальный навалочник-контейнеровоз дедвейтом 70 тыс. т с повышенным коэффициентом общей полноты, у которого был выявлен отрывной характер обтекания кормовой оконечности;
- Балтик-Макс-танкер ледового класса Arc4 дедвейтом около 200 тыс. т, предназначенный для круглогодичного обслуживания портов Балтийского моря;
- быстходный контейнеровоз для перевозки 9500 TEU.

Основные характеристики исследованных судов представлены в таблице.

Технология создания каверн на транспортных судах в настоящее время перешла в стадию, соответствующую натурной проверке и опытному внедрению. Однако для внедрения этой технологии требовалось провести ряд дополнительных исследований, которые выполнялись совместно с конструкторскими бюро и были доведены, как минимум, до уровня технического проекта. Объем выполненных экспериментальных исследований не ограничивался только буксировочными и самоходными испытаниями – для большинства судов он был дополнен мореходными и маневренными испытаниями. Модель Балтик-Макс-танкера прошла дополнительные испытания в мелководном и ледовом опытовых бассейнах. Для большинства представленных судов были выполнены расчеты экономической эффективности применения искусственных каверн.

Современные отечественные исследования не ограничиваются лишь уточнением величины снижения сопротивления судна. Акцент делается прежде

**Таблица.** Основные характеристики исследованных судов с искусственными кавернами

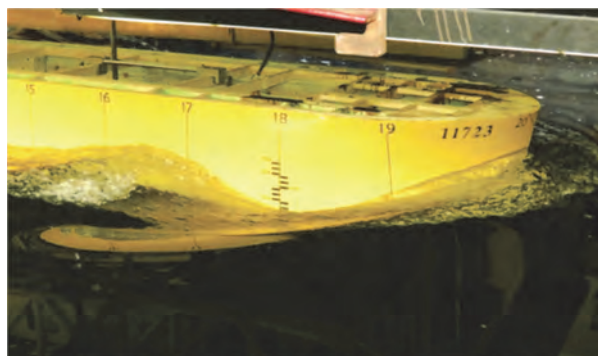
**Table.** Main parameters of studied ships with artificial cavities

Тип судна	Длина, м	Ширина, м	Осадка, м	Водоизмещение, м <sup>3</sup>	Скорость	Снижение сопротивления, %
Танкер «река-море» пр. 81310	80,5	13,0	2,65	2320	16,5 км/ч	23–24
Сухогруз «река-море» пр. 2810	117,8	14,8	3,86	5850	19,0 км/ч	24–25
Сухогруз «река-море» пр. P32.3	108,4	14,8	2,86	3780	18,5 км/ч	23–24
Сухогруз «река-море» пр. 15170	140,2	16,6	4,70	9989	11,5 уз	18–19
Универсальный навалочник-контейнеровоз	234,0	32,2	13,00	80 950 83 485	15,0 уз	16–17 18–19
Балтик-Макс-танкер	326,8	55,0	14,00	192 130	14,0 уз	17–19
Контейнеровоз на 9500 TEU	338,5	45,6	14,75	146 000	24,0 уз	15

*Примечание.* Испытания универсального навалочника-контейнеровоза выполнялись на двух модификациях модели, различавшихся полнотой корпуса (коэффициент общей полноты 0,846 и 0,872).

всего на оценке последствий внедрения каверн – изменениях характеристик конкретного судна, определяющих его экономическую эффективность: строительную стоимость, грузоподъемность, расход топлива судовой энергетической установкой в целом (с учетом дополнительных потерь на поддув воздуха), эксплуатационные затраты на ремонт и поддержание надлежащего технического состояния.

Применительно к глиссирующим судам с каверной за последнее десятилетие были проведены исследовательские работы в рамках проектирования двух глиссирующих катеров с воздушными кавернами для иностранных заказчиков. Кроме того, в России начато серийное строительство нового проекта десантного катера на воздушной каверне.



**Рис. 2.** Волновая картина в носовой оконечности модели сухогруза пр. 15170

**Fig. 2.** Wave conditions at the bow of Project 15170 carrier ship model

В ходе выполнения этих работ был получен ряд новых научных результатов, которым посвящена настоящая статья.

### Применение каверн на судне «река-море» с экстремально высоким коэффициентом общей полноты

*Application of air cavities aboard mixed navigation vessels with extremely high block coefficient*

В последние десятилетия устойчивой тенденцией отечественного судостроения стало повышение полноты обводов крупнотоннажных грузовых судов внутреннего и смешанного «река-море» плавания [13]. Практически все новое поколение судов смешанного «река-море» плавания класса «Волго-Дон макс», построенных в последнее время для внутренних водных путей, имеет коэффициент общей полноты не менее 0,9. Эти суда, максимально соответствующие габаритам шлюзов Волго-Балтийского водного пути (длина судна – порядка 140 м, ширина – 16,5–16,9 м, осадка в реке – 3,6 м), строятся десятками в год. Согласно прогнозам потребность в таких судах сохранится и в перспективе.

Однако наряду с повышением грузоподъемности увеличение полноты обводов корпуса неизбежно приводит к росту волнового сопротивления судна и увеличению градиента гидродинамических давлений, что оказывает негативное влияние на условия формирования каверны.

Для оценки возможности формирования каверн на судах со сверхполными обводами был выполнен комплекс модельных исследований сухогруза смешанного «река-море» плавания пр. 15170 с коэффициентом общей полноты корпуса 0,917. На рис. 2 приведена волновая картина в носовой оконечности модели этого судна на скорости 12,5 уз.

В результате проведенной опытно-конструкторской работы был создан проект судна [3, 25] с искусственной каверной, которая позволила снизить его буксировочное сопротивление на 18-19 %. Его крупномасштабная самоходная модель показана на рис. 3. Таким образом, была экспериментально показана возможность эффективного применения каверн на судах, имеющих сверхполные обводы корпуса.

### Влияние каверны на характер обтекания корпуса судна с отрывом пограничного слоя в кормовой оконечности

Effect of cavity upon boundary layer separations in the aft

Повышение коэффициента общей полноты в последние годы стало характерным не только для судов «река-море», но и для морских транспортных судов. Причем такое изменение обводов часто приводит к формированию зоны отрыва пограничного слоя в кормовой оконечности. Наличие отрыва, в свою очередь, становится причиной увеличения буксировочного сопротивления и ухудшения условий работы гребного винта.

В Крыловском центре была проверена гипотеза о том, что искусственная каверна позволяет изменить обтекание кормы, уменьшить зону отрыва пограничного слоя и улучшить условия работы гребного винта. Исследования проводились на модели универсального навалочника-контейнеровоза дедвейтом 70 тыс. т [5]. Его модель с устройством для создания каверны представлена на рис. 4.

На рис. 5 показана воздушная каверна, снятая из-под воды на скорости, соответствующей 15 уз (нос модели расположен справа). На фотографии хорошо видны три продольные секции каверны с волновым профилем, воздух в каверне выглядит черным.

Выполненные экспериментальные исследования полностью подтвердили сделанные предположения: для судна с повышенной полнотой обводов создание на днище единой воздушной каверны приводит к уменьшению неравномерности набегающего на гребной винт потока в верхней части диска винта по



Рис. 3. Модель судна с искусственной каверной  
Fig. 3. Model of ship with artificial cavity

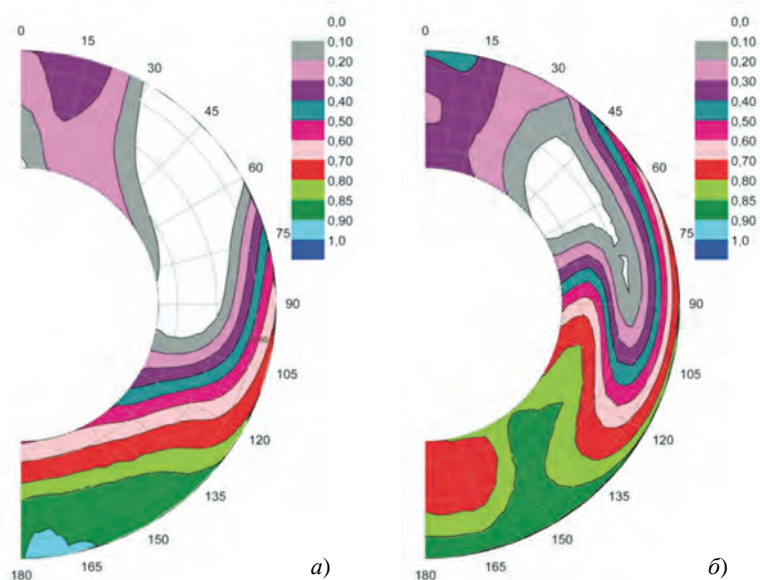


Рис. 4. Модель универсального навалочника-контейнеровоза с устройством для создания каверны  
Fig. 4. Model of multi-purpose bulker / containership with device for air cavity generation



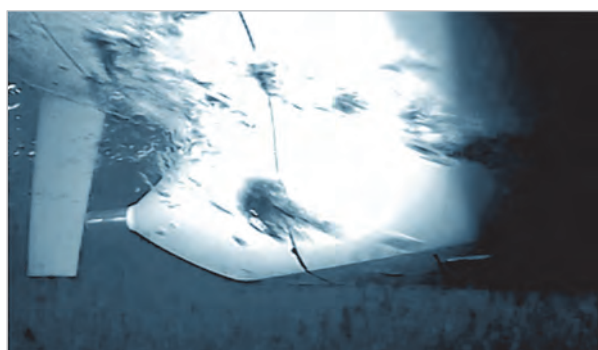
Рис. 5. Воздушная каверна на скорости 15 уз  
Fig. 5. Air cavity at the speed of 15 knots





**Рис. 6.** Результат измерения поля скоростей в плоскости диска гребного винта модели универсального навалочника-контейнеровоза: а) без каверны; б) с каверной

**Fig. 6.** Wake field measurement data for the model of multi-purpose bulker / container ship: а) without cavity; б) with cavity



а)



б)

**Рис. 7.** Действие устройства для защиты гребного винта от попадания воздуха: а) без устройства; б) с устройством

**Fig. 7.** Effect of the device for propeller protection against air penetration: а) without protection; б) with protection

сравнению с базовым вариантом. В свою очередь выравнивание поля скоростей в месте расположения гребных винтов вызывает снижение вибрационных явлений и улучшение условий работы движителей [4].

Эта особенность отчетливо просматривается по результатам замеров поля скоростей в месте расположения гребных винтов. Наглядной иллюстрацией является сопоставление линий равных скоростей в диске гребного винта модели универсального навалочника-контейнеровоза, приведенное на рис. 6.

По сравнению с полем скоростей, измеренным на исходном варианте корпуса (без каверны), поле скоростей, полученное при наличии единой каверны, более равномерно, зона отрыва (на рисунке она отмечена белым цветом) существенно меньше. Таким образом, можно утверждать, что наличие каверны на днище транспортного судна с полными обводами оказывает положительное влияние на обтекание кормовой оконечности.

Положительное воздействие каверны на отрывное течение в кормовой оконечности заставило внести существенные изменения и в метод пересчета буксировочного судна с каверной [12].

В процессе испытаний модели универсального навалочника-контейнеровоза с каверной был получен еще один важный в практическом отношении результат: разработан новый, более эффективный по сравнению с ранее использовавшимся, вариант устройства для защиты гребного винта одновалного судна от попадания пузырьков воздуха, уносимых из каверн [26]. Об эффективности этого устройства можно судить по рис. 7. Видно, что

без защитного устройства пузырьки воздуха (на рисунке они кажутся темными пятнами) даже при отсутствии гребного винта проходят через зону его расположения. Установка защитного устройства обеспечивает работу винта без прососа воздуха.

Выполненные проработки подтвердили возможность реализации предложенных в концептуальном проекте технических решений. Также из анализа полученных экономических показателей следует, что эксплуатация варианта универсального навалочника-контейнеровоза с каверной является экономически эффективной на всех предполагаемых маршрутах [2].

### Испытания модели Балтик-Макс-танкера ледового класса Arc4 с каверной в ледовом бассейне

Model tests of ARC4 BalticMax tanker with air cavity in Ice Basin

Предполагаемая зимняя эксплуатация танкера Балтик-Макс (рис. 8) в ледовых полях Балтийского моря и его использование в Арктике привели к необходимости проведения модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне [6, 7, 18]. Такие испытания для судна с каверной проводились впервые. Их цель заключалась в определении влияния каверны на показатели ледопроеходимости танкера. Поскольку модель судна с каверной впервые проходила комплексные испытания в ледовом бассейне, было важно установить, не застревают ли обломки льда в днищевом рецессе.

Самоходная модель танкера испытывалась в двух вариантах корпуса – базовое судно и судно с каверной – при толщине натурального льда 1,0 и 1,5 м. Наряду с ровным ледяным полем проводились испытания в битом льду сплоченностью 8 баллов. На рис. 9 показана модель с каверной во время испытаний в ледовом опытовом бассейне при толщине льда, соответствующей 1,5 м.

Результаты, полученные в ходе модельных испытаний при балластной и грузовой осадках, дают основание утверждать, что танкер сможет преодолевать сплошной ровный ледяной покров толщиной 1 м со скоростью 2 уз. Работа каверны уменьшает ледовое сопротивление корпуса на 3–5 % при движении в ровном ледяном покрове, а также в условиях битого льда. При этом, что важно, осколки льда, проходя под днищем судна, не застревают в рецессе. Тем не менее дополнительно было предложено техническое реше-



Рис. 8. Внешний вид танкера Балтик-Макс

Fig. 8. General view of BalticMax tanker

ние, предотвращающее застревание кусков льда под козырьками при движении судна задним ходом [28].

В рамках выполнения этой работы был найден еще один интересный способ использования искусственной каверны. Речь идет о разработке дифференциально-креновой системы, предназначенной для высвобождения судна из ледового плена [29].

Традиционно на судах ледового класса для этой цели используются балластные цистерны, расположенные по бортам и в оконечностях судна. По системе трубопроводов вода насосами перекачивается с борта на борт и между оконечностями. Судно приобретает крен и дифферент, разламывает лед и, таким образом, получает возможность двигаться.



Рис. 9. Модель с каверной при испытаниях в ледовом опытовом бассейне

Fig. 9. Model with cavity during the tests in Ice Basin

На судне с каверной можно обойтись без цистерн, насосов и трубопроводов. Наличие большой разделенной на отдельные секции воздушной полости под днищем позволяет добиться аналогичного эффекта путем подачи воздуха только в носу или в корме (для обеспечения дифферента) либо только к одному борту (для создания крена). В результате судно станет переваливаться с борта на борт, нос и корма судна будут подниматься и опускаться, разламывая лед и тем самым высвобождаясь из ледового плена.

Еще один интересный экспериментальный факт был установлен в результате проведения испытаний модели танкера в маневренном бассейне [1]. Оказалось, что прекращение подачи воздуха позволяет улучшить характеристики управляемости. Хотя танкер с каверной обладает хорошей поворотливостью (диаметр установившейся циркуляции составляет 2,3 длины судна, что с гарантированным запасом укладывается в международные требования), отсутствие в рецессе воздуха позволило дополнительно уменьшить радиус циркуляции в 1,4 раза. Этим можно воспользоваться при маневрировании судна в условиях ограниченной акватории или при выполнении швартовых операций, когда нет необходимости получать эффект от снижения буксировочного сопротивления.

Единая воздушная каверна на днище танкера при движении полным ходом 14 уз в условиях тихой воды и на волнении до 4 баллов включительно обеспечивает снижение потребной мощности главного двигателя на 17–19 % по сравнению с базовым судном. В случае снижения скорости до эксплуатационной 12 уз потребная мощность должна уменьшиться на 19–24 %.



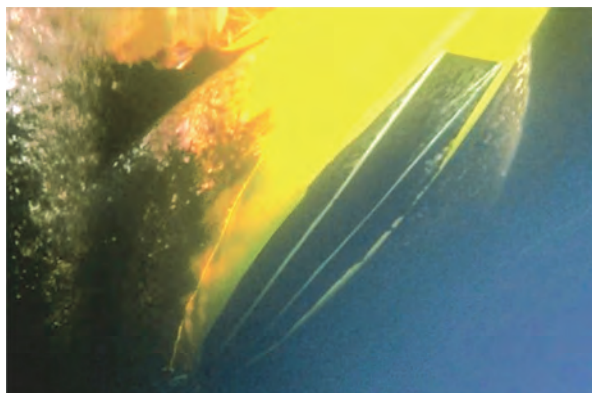
**Рис. 10.** Модель контейнеровоза с рецессом  
**Fig. 10.** Model of containership with recess

## Исследование возможности эффективного применения каверн на быстроходных водоизмещающих судах

Feasibility study of efficient air cavity application aboard fast displacement ships

До недавнего времени все исследования по применению искусственных каверн на транспортных судах проводились для скоростей, не превышающих 16 уз [4]. Между тем в последние годы устойчивым трендом мирового судостроения является создание крупных контейнеровозов длиной более 350 м, дедвейтом более 100 тыс. т, способных перевозить 8 тыс. контейнеров TEU и даже более со скоростями до 20–25 уз. Увеличение размеров контейнеровозов позволяет повысить провозную способность флота и снизить себестоимость перевозок. Однако повышение их скорости ведет к росту мощности главной энергетической установки до 60 МВт и выше и, как следствие, к значительному расходу топлива и дополнительной эмиссии углекислого газа. Следовало ожидать, что применение искусственных каверн на таких судах позволит снизить мощность главной энергетической установки и расход топлива.

Исследование возможности создания эффективной каверны было выполнено на модели быстроходного контейнеровоза, предназначенного для перевозки 9500 TEU, который спроектирован компанией Navalprogetti (Италия) совместно с Университетом Триеста (Италия) [15–17]. Его основные характеристики приведены в таблице. Отличительной особенностью корпуса контейнеровоза



**Рис. 11.** Воздушная каверна на скорости 24 уз  
**Fig. 11.** Air cavity at the speed of 24 knots



является отсутствие цилиндрической вставки, заостренные оконечности и вытянутая форма плоского днища, которое можно использовать для создания каверны. С другой стороны, контейнерные суда весьма привлекательны для внедрения каверн, поскольку имеют крупные размеры, мало подвержены качке и в процессе эксплуатации практически не совершают порожних рейсов (балластных переходов).

В результате компьютерной и модельной отработки были подобраны обводы корпуса, позволяющие формировать эффективную искусственную каверну. Модель контейнеровоза с рецессом показана на рис. 10. На рис. 11 представлена воздушная каверна, которая сфотографирована под водой на скорости, соответствующей 24 уз.

Подобранная форма рецесса в значительной степени отличается от всех испытанных ранее моделей транспортных судов, имеющих прямоугольные рецессы. На контейнеровозе две боковые секции рецесса выполнены трапециевидными с малым углом стреловидности носового редана. На скорости полного хода 24 уз применение каверны привело к снижению потребной мощности в пересчете на натурные условия на тихой воде (до 4 баллов) на 15 % по сравнению с базовым вариантом.

## Разработка автоматизированной системы создания искусственных каверн

Development of automated system for artificial cavity generation

При эксплуатации транспортного судна могут возникнуть условия, когда существование единой воздушной каверны невозможно, например значительный дифферент при движении судна в балласте и сильное волнение. Когда статический дифферент или килевая качка становятся больше некоторого, зависящего от глубины рецесса, допустимого значения, единая каверна касается днища рецесса и распадается на систему коротких каверн. Эффект от использования устройства при этом резко падает и даже может стать отрицательным.

Для устранения указанного недостатка было предложено автоматизированное устройство создания каверн [10, 11]. Суть предложения состоит в следующем. При условиях, когда существование единой каверны невозможно, основным источником дополнительного сопротивления явля-

ются поперечные козырьки, за которыми формируется отрывное течение, увеличивающее буксировочное сопротивление. Если выполнить козырьки складывающимися на днище, то можно в значительной степени уменьшить негативный эффект от наличия устройства создания каверны. Различные модификации данного устройства защищены российскими [20, 21, 24] и международными [30, 31] патентами. Анализ различных способов управления козырьками показал, что наиболее рациональным является пневмопривод [22, 23], поскольку на судне с каверной и так имеется достаточное количество компрессоров и создана система трубопроводов для подвода воздуха под днище.

## Анализ результатов самоходных испытаний

Analysis of self-propulsion test results

Заканчивая обзор научно-исследовательских работ по созданию транспортных судов с искусственными кавернами, следует отметить анализ имеющихся в Крыловском центре результатов самоходных испытаний восьми моделей с кавернами, выполненный для определения влияния каверн на пропульсивный коэффициент и на коэффициенты взаимодействия гребного винта с корпусом [4].

Пропульсивный коэффициент гребного винта зависит от КПД гребного винта и от взаимодействия движителя с корпусом. Согласно выполненному анализу создание на днище каверн приводит к столь значительному снижению буксировочного сопротивления судна, что в обязательном порядке требует проектирования «своего» оптимального гребного винта, КПД которого будет существенно выше, чем у базового судна [4]. При оптимизации движителя судна с каверной его пропульсивный коэффициент может возрасти примерно на 0,03–0,07 по сравнению с традиционным вариантом корпуса.

## Глиссирующие катера с каверной

Gliding boats with air cavity

К настоящему времени в России разработано более 40 проектов быстроходных судов на каверне различного назначения. По восьми из них построено около сотни катеров водоизмещением от 14 до 300 т со скоростью хода от 30 до 52 уз.





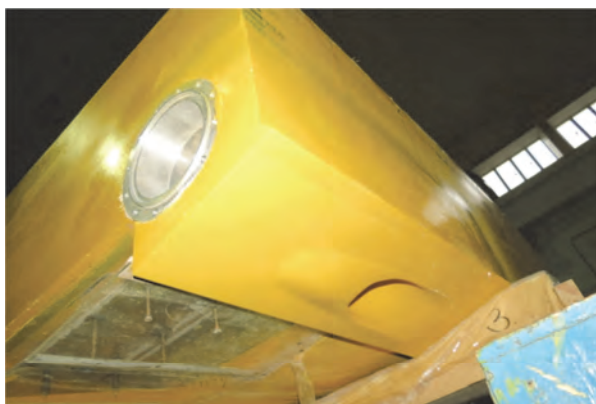
**Рис. 12.** Десантный катер на искусственной каверне пр. 21820 «Дюгонь»

**Fig. 12.** Project 21820 *Dugong* air-cavity landing boat



**Рис. 13.** Быстроходная моторная яхта «Барракуда»

**Fig. 13.** *Barracuda* fast motor yacht



**Рис. 14.** Водозаборное отверстие в скеге самоходной модели катера на воздушной каверне

**Fig. 14.** Water inlet in the skeg of self-propelled air-cavity boat model

В 2009 г. началось серийное строительство десантных катеров на искусственной каверне пр. 21820 «Дюгонь» [11] (рис. 12). Проектант – АО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева». Катер при скорости 35 уз имеет грузоподъемность 120 т. На сегодняшний день это самый большой катер на искусственной каверне. Наряду с проведением модельных испытаний специалисты Крыловского центра приняли участие в проектировании для катера вентилируемых водометных движителей, а также рекомендовали наиболее оптимальную геометрию и положение рулей [14].

В 2009 г. в Крыловском центре по заказу итальянской компании Gietme S.p.A. были выполнены работы по отработке формы обводов корпуса 60-футовой быстроходной моторной яхты «Барракуда» на искусственной каверне [11, 19] (рис. 13). Яхта имеет длину 18,4 м и максимальную скорость 55 уз. Принципиальное отличие яхты от испытанных ранее катеров заключается в использовании чрезвычайно легкого материала корпуса (*sprint system material*), который позволяет значительно уменьшить водоизмещение. Согласно результатам буксировочных испытаний модели яхты в диапазоне эксплуатационных скоростей применение каверны должно уменьшить буксировочное сопротивление на 20–24 %. Такое снижение сопротивления позволило увеличить скорость полного хода на 5 уз (с 50 до 55 уз) и сократить расход топлива при движении с крузиной скоростью примерно на 20 %.

Еще одной исследовательской работой, которая закончилась в 2017 г., стала отработка обводов 17-метрового катера на искусственной каверне для Сингапурской компании *Singapore Technologies Marine Ltd*. Отличительной особенностью катера является использование традиционных водометных движителей, которые размещаются в расширенных скегах. На рис. 14 показано водозаборное отверстие в скеге самоходной модели.

Кроме всего вышеуказанного за последнее десятилетие была разработана новая технология проведения гидродинамических испытаний быстроходных судов с воздушными кавернами в опытовом бассейне [27]. Технология позволила не только более точно подобрать геометрию днищевых обводов судна с каверной, но и экономить время, затрачиваемое на выполнение компьютерных расчетов, значительно сократить объем испытаний в опытовом бассейне и уменьшить время переделки модели.

## Библиографический список

1. *Афанасов Е.Н.* Экспериментальное исследование управляемости крупнотоннажного танкера с днищевой воздушной каверной // Тезисы докладов «Ежегодной отраслевой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов». ФГУП «Крыловский государственный научный центр». СПб., 20–21 октября 2015. С. 13–14.
2. *Буянов А.С., Лыхачева М.А.* Оценка экономической эффективности внедрения устройства для создания единой воздушной каверны на днище судна (УСЕК) на примере универсального навалочника-контейнеровоза дедвейтом 70 000 т // Сборник научных трудов АО «ЦНИИМФ». 2015. Вып. 1. С. 23–37.
3. *Горбачев Ю.Н., Буянов А.С., Сверчков А.В.* Перспективный способ совершенствования конструкции судов внутреннего и смешанного река-море плавания // Речной транспорт (XXI век). 2014. № 6. С. 28–34.
4. *Горбачев Ю.Н., Сверчков А.В., Галушина М.В.* Пропульсивные качества водоизмещающих судов с единой воздушной каверной на днище // Судостроение. 2015. № 1. С. 17–23.
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. *Малов Е.В., Сверчков А.В., Стрельников Н.В., Терентьев А.А.* Разработка концептуального проекта танкера с ограниченной осадкой и энергосберегающей каверной для круглогодичного вывоза нефти из портов Балтийского моря // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2015. № 40/41. С. 31–37.
7. *Малов Е.В., Сверчков А.В., Стрельников Н.В., Терентьев А.А.* Устройство для создания единой воздушной каверны на танкере как энергосберегающая технология // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 91(375). С. 125–138.
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. *Сверчков А.В.* Исследования в области применения искусственных каверн для снижения гидродинамического сопротивления судов / Академик А.Н. Крылов. К 150-летию со дня рождения. Сборник статей. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. С. 65–82.
10. *Сверчков А.В., Горбачев Ю.Н.* Пересчет с модели на натуре результатов испытаний водоизмещающих судов с единой воздушной каверной на днище // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 87–102.
11. *Сверчков А.В., Щемелинин Л.Г.* Гидродинамические аспекты повышения полноты обводов судов смешанного река-море плавания // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1(379). С. 26–35.
12. *Яковлева О.В., Салазкин И.В., Егорова Н.И., Фомичев Д.В.* Особенности формирования управляющих сил на судах с днищевой воздушной каверной с вентилируемыми водометными движителями // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 88(372). С. 69–80.
13. *Borusevich V., Poustoshny A., Sverchkov A., Trincas G.* Artificial cavity system as power saving technology for containerships // Proceedings of the 8<sup>th</sup> Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, Ocean Technology and Constructions. APHydro 2016. Hanoi, 20–23 September, 2016. P. 258–268.
14. *Borusevich V., Poustoshny A., Sverchkov A., Trincas G.* Impact of air cavity technology on ship drag reduction: experience from research studies // 10<sup>th</sup> Symposium on High-Performance Marine Vehicles (HIPER'16). Cortona, Italy, 17–19 October 2016. P. 94–107.
15. *Borusevich V., Poustoshny A., Sverchkov A., Trincas G.* Future outlook of artificial cavity application for reducing hydrodynamic resistance of containerships // Journal of Energy and Power Engineering. 2017. No. 11. P. 150–159.
16. *Pustoshny A., Sverchkov A., Cok L., Trincas G., Bussetto P.* Artificial air cavity as energy saving technology // Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Ships and Sipping Research (NAV 2015). Lecco, Italy, 24–26<sup>th</sup> June, 2015. Paper 33. P. 392–402.
17. *Sverchkov A.V.* Application of air cavities on high-speed ships in Russia // Proceedings of International Conference on Ship Drag Reduction (SMOOTH-Ships). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 20–21 May, 2010 P. 103–111.
18. Патент на изобретение RU 2461489 от 20.09.2012. Водоизмещающее судно с воздушными кавернами. *Горбачев Ю.Н., Мещанов Е.А., Пустошный А.В., Сверчков А.В.*
19. Патент на изобретение RU 2488511 от 27.07.2013. Водоизмещающее судно с воздушными кавернами на днище. *Горбачев Ю.Н., Мещанов Е.А., Пустошный А.В., Сверчков А.В.*
20. Патент на полезную модель RU 134511 от 20.11.2013. Пневмопривод для кавернообразующих

- подвижных элементов водоизмещающего судна. Горбачев Ю.Н., Мещанов Е.А., Сверчков А.В.
21. Патент на изобретение RU 2524762 от 10.08.2014. Пневмосистема для судна с воздушными кавернами на днище. Абдрехимов В.А., Горбачев Ю.Н., Мещанов Е.А., Савинов А.С., Сверчков А.В.
  22. Патент на изобретение RU 2530905 от 20.10.2014. Судно с воздушной каверной на днище. Горбачев Ю.Н., Пустошный А.В., Сверчков А.В.
  23. Патент на полезную модель RU 147820 от 20.11.2014. Судно смешанного «река-море» плавания с большой полной обводов корпуса с воздушной каверной на днище. Анцев Г.В., Платонов С.В., Кузнецов Г.П., Айзен С.Н., Юркин Ф.А., Лосев Ю.В., Крюков М.С., Сверчков А.В., Горбачев Ю.Н.
  24. Патент на изобретение RU 2578896 от 01.03.2016. Судно с воздушной каверной на днище и устройством для защиты от попадания воздуха на гребной винт. Сверчков А.В.
  25. Патент на изобретение RU 2535384 от 10.12.2014. Устройство для проведения гидродинамических испытаний в опытовом бассейне моделей быстроходных судов с воздушной каверной. Сверчков А.В.
  26. Патент на полезную модель RU 157049 от 28.10.2015. Водоизмещающее судно с воздушной каверной на днище. Сверчков А.В.
  27. Патент на изобретение RU 2601997 от 10.11.2016. Водоизмещающее судно с воздушной каверной на днище с дифференциально-креновой системой. Сверчков А.В.
  28. EP 2617640 of 25.05.2016. Water displacement boat with air cavities on the bottom.
  29. EP 3000712 of 07.06.2017. Ship with bottom air cavity.
  5. Gorbachev Yu., Buyanov A., Sverchkov A. 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. Malov Ye., Sverchkov A., Strelnikov N., Terentyev A. Conceptual design of shallow-draught air-cavity tanker for all-year oil shipping from Baltic ports // *RS Research Bulletin*. 2015. No. 40/41. P. 31–37 (in Russian).
  7. Malov Ye., Sverchkov A., Strelnikov N., Terentyev A. Device for generation of continuous air cavity on tanker hull for energy saving purposes. // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2016. Issue 91(375). P. 125–138 (in Russian).
  8. Sverchkov A., Pustoshny A., Gorbachev Yu. Experimental study and design activities on application of air cavities for coastal shipping vessels // *Transactions of the Krylov State Research Institute*. 2012. Issue 69(353). P. 23–38 (in Russian).
  9. Sverchkov A. Application of artificial cavities for hydrodynamic resistance mitigation of ships // *To the 150<sup>th</sup> Anniversary of Academician A. Krylov*. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2013. P. 65–82 (in Russian).
  10. Sverchkov A., Gorbachev Yu. Extrapolation of model test data for displacement ship with single air cavity at the bottom // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2015. Issue 90(374). P. 87–102 (in Russian).
  11. Sverchkov A., Schemelinin L. Hydrodynamic aspects of more ample hull lines for mixed (river-sea) navigation vessels // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. Issue 1(379). P. 26–35 (in Russian).
  12. Yakovleva O., Salazkin I., Yegorova N., Fomichev D. Peculiarities of controlling force generation on the ships with bottom air cavity and ventilated waterjet propulsors // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2015. Issue 88(372). P. 69–80 (in Russian).
  13. Borusevich V., Poustoshny A., Sverchkov A., Trincas G. Artificial cavity system as power saving technology for containerships // *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Naval Architecture, Ocean Technology and Constructions*. APHydro 2016. Hanoi, 20–23 September, 2016. P. 258–268.
  14. Borusevich V., Poustoshny A., Sverchkov A., Trincas G. Impact of air cavity technology on ship drag reduction: experience from research studies // *10<sup>th</sup> Symposium on High-Performance Marine Vehicles (HIPER'16)*. Cortona, Italy, 17–19 October 2016. P. 94–107.
  15. Borusevich V., Poustoshny A., Sverchkov A., Trincas G. Future outlook of artificial cavity application for reducing hydrodynamic resistance of containerships // *Journal of Energy and Power Engineering*. 2017. No. 11. P. 150–159.

## References

1. Afanasov Ye. Maneuvrability tests of large tanker with bottom air cavity // *Theses of messages. Annual industrial scientific & technical conference of young scientists and engineers*. Krylov State Research Centre, St. Petersburg, October 20–21, 2015. P. 13–14 (in Russian).
2. Buyanov A., Likhacheva M. Cost efficiency assessment of applying bottom air cavity generation device. Case study: multi-purpose bulker / containership, deadweight 70,000 t. *JSC TsNIIMF*, 2015, Issue 1. P. 23-37 (in Russian).
3. Gorbachev Yu., Buyanov A., Sverchkov A. A promising way of improving designs of inland and mixed (river-sea) navigation vessels // *River transport (XXI<sup>st</sup> century)*. 2014. No. 6. P. 28–34 (in Russian).
4. Gorbachev Yu., Sverchkov A., Galushina M. Propulsion qualities of water displacing vessels with integrated air cavern on bottom // *Sudostroenie (Shipbuilding)*. 2015. No. 1. P. 17–23 (in Russian).

16. Pustoshny A., Sverchkov A., Cok L., Trincas G., Bussetto P. Artificial air cavity as energy saving technology // Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Ships and Shipping Research (NAV 2015). Lecco, Italy, 24–26<sup>th</sup> June, 2015. Paper 33. P. 392–402.
17. Sverchkov A.V. Application of air cavities on high-speed ships in Russia // Proceedings of International Conference on Ship Drag Reduction (SMOOTH-Ships). Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, 20–21 May, 2010 P. 103–111.
18. Patent for Invention RU 2461489 dt. 20.09.2012. Displacement ship with air cavities. Gorbachev Yu., Meschanov Ye., Pustoshny A., Sverchkov A. (in Russian).
19. Patent for Invention RU 2488511 dt. 27.07.2013. Displacement ship with air cavities. Gorbachev Yu., Meschanov Ye., Pustoshny A., Sverchkov A. (in Russian).
20. Patent for Useful Model RU 134511 dt. 20.11.2013. Pneumatic drive for cavity-generating moving parts of displacement ship. Gorbachev Yu., Meschanov Ye., Sverchkov A. (in Russian).
21. Patent for Invention RU 2524762 dt. 10.08.2014. Pneumatic system for ship with bottom air cavities. Abdrekhimov V., Gorbachev Yu., Meschanov Ye., Savinov A., Sverchkov A. (in Russian).
22. Patent for Invention RU 2530905 dt. 20.10.2014. Gorbachev Yu., Pustoshny A., Sverchkov A. (in Russian).
23. Patent for Useful Model RU 147820 dt. 20.11.2014. Mixed (river-sea) navigation vessel with very ample hull lines and bottom air cavity. Antsev G., Platonov S., Kuznetsov G., Aizen S., Yurkin F., Losev Yu., Kryukov M., Sverchkov A., Gorbachev Yu. (in Russian).
24. Patent for Invention RU 2578896 dt. 01.03.2016. Ship with bottom air cavity and protective device against air penetrations to propeller. Sverchkov A. (in Russian).
25. Patent for Invention RU 2535384 dt. 10.12.2014. Device for hydrodynamic model tests of fast ships with air cavity. Sverchkov A. (in Russian).
26. Patent for Invention RU 157049 dt. 28.10.2015. Displacement ship with bottom air cavity. Sverchkov A. (in Russian).
27. Patent for Invention RU 2601997 dt. 10.11.2016. Displacement ship with bottom air cavity and trimming & heeling system. Sverchkov A. (in Russian).
28. EP 2617640 of 25.05.2016. Water displacement boat with air cavities on the bottom.
29. EP 3000712 of 07.06.2017. Ship with bottom air cavity.

---

### Сведения об авторах

Сверчков Андрей Владимирович, к.т.н., старший научный сотрудник, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Борусевич Валерий Олегович, начальник отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 415-49-41. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

### About the authors

Andrey V. Sverchkov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 748-63-26. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Valery O. Borusevich, Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-49-41. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 20.10.18  
Принята в печать / Accepted: 29.01.19  
© Сверчков А.В., Борусевич В.О., 2019