

Суда на воздушной каверне: реальный способ повышения энергоэффективности и экологической безопасности

&

Экономия топлива и снижение выбросов в атмосферу продуктов его сгорания являются в настоящее время наиболее острыми проблемами водного транспорта. В решении этих проблем одним из наиболее эффективных и реально достижимых средств является создание воздушных каверн на днище судна с помощью разработанного в России сравнительно простого устройства.

Объекты исследования

02
2015

Принцип действия устройства иллюстрирует рисунок 1.

Единая каверна создается внутри рецесса (углубления) в днище, ограниченного в носовой части реданом (5), по бортам — бортовыми киями (3) и в кормовой части — кормовым сводом (8). Для повышения поперечной остойчивости судна внутри рецесса устанавливаются продольные кили (4), которые разделяют рецесс на изолированные секции. Воздух в рецесс подается от компрессора (1) по системе трубопроводов (2).

На стоянке при посадке корпуса на «ровный киль» рецесс полностью заполняется воздухом и поверхность раздела сред «воздух-вода», которая всегда параллельна горизонту, совпадает с основной плоскостью (ОП) днища. Осадка и водоизмещение судна с каверной и его традиционно-го аналога при этом одинаковы.

При движении судна внутри рецесса в каждой продольной сек-



ЮРИЙ ГОРБАЧЕВ,
генеральный
конструктор ОАО
«Инженерный центр
судостроения», д.т.н.



АЛЕКСАНДР БУЯНОВ,
заведующий отделом
ЗАО «ЦНИИМФ», к.э.н.



АНДРЕЙ СВЕРЧКОВ,
начальник сектора
ФГУП «Крыловский
государственный
научный центр», к.т.н.

ции образуются единые каверны, профиль (продольное сечение) которых близок к гравитационным волнам. Площадь смоченной поверхности судна при этом значительно уменьшается, в результате чего достигается снижение гидродинамического сопротивления корпуса, а следовательно, потребной мощности и расхода топлива главных двигателей. Для возможности образования единых каверн без остановки судна внутри рецесса устанавливаются

поперечные козырьки (6), выполненные в виде наклонных пластин. Их параметры подбираются таким образом, чтобы при наборе скорости происходило автоматическое, без вмешательства судоводителя, объединение системы отдельных каверн, образованных за реданом и поперечными козырьками, в единую каверну с волновым профилем. Кроме того, козырьки позволяют в ряде случаев сохранить положительный эффект при разрушении единых

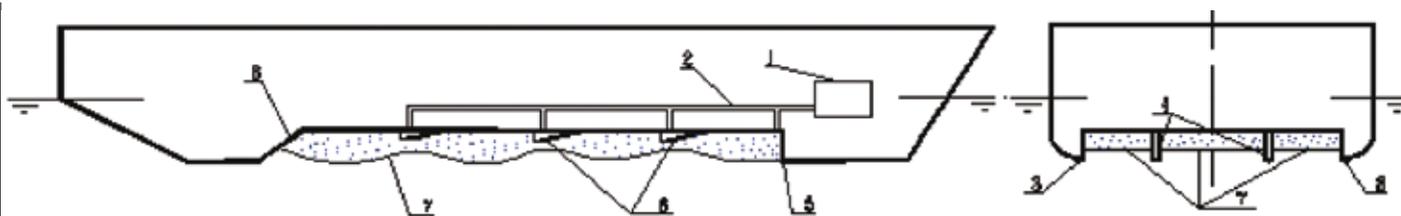


РИС. 1. СХЕМА УСТРОЙСТВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ НА ДНИЩЕ ЕДИНОЙ ВОЗДУШНОЙ КАВЕРНЫ

каверн (из-за качки, значительного ходового дифферента на тихой воде и т.п.), т.к. в этом случае за реданом и козырьками сохраняется система отдельных каверн.

Многолетние модельные испытания речных, смешанного «рекаморе» плавания и морских судов (всего 13 различных типов), а также натурные испытания речной баржи грузоподъемностью около 1000 т однозначно свидетельствуют о возможности значительного снижения гидродинамического сопротивления (на тихой воде для самоходных судов на 16-24%, у речных барж — до 30%). При этом затраты энергии на поддув воздуха не превышают 2÷3% от мощности главных двигателей.

По результатам этих испытаний Минречфлотом РФ в начале 90-х годов была принята программа создания ряда самоходных судов, оснащенных устройством для создания единой каверны (УСЕК). К сожалению, по экономическим причинам эта программа не была реализована, и в исследованиях по этому направлению наступила «бизнес-пауза» длиной более 20 лет. Новый импульс исследования энергосберегающей технологии получили уже в XXI веке, причем не только в России, но и в ряде ведущих судостроительных стран. Современные отечественные исследования не ограничиваются только определением достижимого снижения сопротивления судна, упор делается на оценку влияния УСЕК на характеристики судна, определяющие его экономическую эффективность: строительную стоимость, грузоподъемность, расход топлива судовой энергетической установкой в целом (с учетом дополнительных затрат на поддув воздуха), эксплуатационные затраты на ремонт и поддержание технического состояния судна. Необходимо также

оценить влияние УСЕК на безопасность плавания.

Именно в таком ключе была выполнена сопоставительная оценка двух концептуальных проектов одного судна: универсального навалочника-контейнеровоза типа «панамакс» дедвейтом ок. 70 000 т в традиционном исполнении (разработан ЦКБ «Балтсудопроект» Крыловского государственного научного центра) и того же судна с УСЕК (разработан ОАО «Инженерный центр судостроения»). Универсальный навалочник-контейнеровоз (УНК) представляет собой морское, стальное, однопалубное судно неограниченного района плавания, с баком, без седловатости верхней палубы, с кормовым расположением машинного отделения и надстройки, с семью грузовыми трюмами, с бульбовой носовой и транцевой кормовой оконечностями, с двойным дном и двойными бортами. По сути, это традиционный навалочник, размеры трюмов которого выбраны таким образом, чтобы обеспечить размещение в них максимального количества стандартных контейнеров. Перевозка контейнеров рассматривается как возможное средство повышения экономической эффективности судна.

Сравниваемые суда отличаются лишь теми элементами, которые обусловлены использованием УСЕК. Эти отличия сводятся к следующему:

1. Изменяется конструкция корпуса в связи с образованием рецесса в плоской части днища и установкой указанных выше элементов устройства. Из-за наличия рецесса для сохранения вместимости грузовых трюмов судна с УСЕК при одинаковой с традиционным аналогом высоте междудонного пространства и высоте комингсов грузовых люков

высота борта по всей длине судна увеличивается на глубину рецесса.

2. Судно оборудуется дополнительной судовой системой — системой подачи воздуха (СПВ) в днищевой рецесс для создания и поддержания в нем воздушных каверн.

3. Возможна замена главных двигателей в связи с тем, что при создании воздушных каверн значительно снижается потребляемая мощность ГД, необходимая для достижения заданной скорости хода. Отсюда следует также, что при заданной дальности плавания для судна с УСЕК потребуются меньшие запасы топлива.

4. Возможна замена состава судовой электростанции в связи с появлением дополнительного потребителя электроэнергии — компрессора СПВ (для УНК с УСЕК замены не потребовалось).

В остальном характеристики сравниваемых судов принимаются одинаковыми, в том числе влияющие на экономические показатели — вид топлива СЭУ, объем грузовых трюмов, состав экипажа и т.д.

Проектирование УСЕК выполнялось по разработанной Ю.Н. Горбачевым методике, базирующейся на расчетном определении формы поверхности устойчивых воздушных каверн на днище конкретного судна. Использование этой методики позволяет определить оптимальные параметры рецесса (расположение редана, длину и глубину рецесса, параметры поперечных козырьков), при которых единые каверны сохраняются во всем расчетном диапазоне скоростей хода не только при идеальном положении корпуса на «ровный киль», но и при наличии крена и дифферента, не превышающих заданные допустимые значения, а также с учетом прогиба судна. Следует подчеркнуть, что правильный выбор параметров рецесса является

наиболее ответственным моментом, определяющим не только эффективность, но и саму работоспособность УСЕК в реальных условиях эксплуатации судна. Объясняется это следующими причинами. Установлено, что отстояние поверхности единой каверны от днища рецесса (зазор между каверной и днищем рецесса) уменьшается при увеличении длины рецесса. Может оказаться, что даже небольшое увеличение длины рецесса при фиксированном значении его глубины приведет к разрушению единой каверны. Очень сильное влияние на форму поверхности единой каверны оказывает дифферент, который практически всегда присутствует при эксплуатации судна (влияние крена гораздо менее заметно). Когда дифферент становится больше некоторого, зависящего от глубины рецесса, допустимого значения, единая каверна касается днища рецесса и распадается на систему отдельных каверн. Эффект от использования устройства при этом резко падает и может оказаться даже отрицательным.

Уменьшение зазора между поверхностью каверны и днищем рецесса происходит также вследствие прогиба корпуса груженого судна.

Таким образом, оптимальная глубина рецесса довольно сильно зависит как от расположения и длины рецесса, так и от заданного допустимого дифферента и прогиба судна. Увеличение длины рецесса позволяет несколько повысить выигрыш в сопротивлении, увеличение

ТАБЛИЦА 1. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Наименование характеристики	УНК	
	с УСЕК	без УСЕК
Длина наибольшая, м	234,0	234,0
Ширина расчетная, м	32,2	32,2
Высота борта, м	19,2	18,2
Осадка наибольшая (с грузом угля или руды), м	13,0	13,0
Водоизмещение объемное при наибольшей осадке, м ³	80 953	80 953
Коэффициент общей полноты, С _в	0,846	0,846
Количество и суммарный объем грузовых трюмов, м ³	7/74 000	7/74 000
Количество и мощность дизель-генераторов, кВт	3x950	3x950
Характеристики компрессора СПВ:		
– мощность, кВт	315	-
– производительность на выходе, м ³ /час	3600	-
– давление на выходе, МПа	0,15	-
Относительная площадь рецесса, SP/Ω	0,310	-
Диаметр гребного винта, м	6,5	6,5
Расчетная скорость при использовании 85% МДМ, уз.	15,0	15,0

же глубины рецесса весьма нежелательно, т.к. ведет к росту массы корпуса и, следовательно, к снижению грузоподъемности судна. Определить оптимальные характеристики рецесса чисто экспериментальным путем крайне сложно, поскольку для этого требуется выполнить замеры профиля каверны (что само по себе является довольно трудоемкой процедурой) при разных значениях многочисленных параметров. Практически решить эту задачу можно лишь путем использования как расчетных методов (в части

определения характеристик рецесса по результатам многовариантных расчетов устойчивых каверн), так и модельного эксперимента (в части проверки работоспособности устройства и определения величины энергосберегающего эффекта).

Основные характеристики сравниваемых вариантов УНК приведены в таблице 1.

У сравниваемых вариантов УНК величина расчетной скорости принималась одинаковой, а мощность ГД определялась по результатам модельных испытаний.



РИС. 2. МОДЕЛЬ УНК С УСЕК. МАСШТАБ 1:36.1



РИС. 3. МОДЕЛЬ УНК С ВОЗДУШНОЙ КАВЕРНОЙ ВО ВРЕМЯ ИСПЫТАНИЙ (НОС МОДЕЛИ СПРАВА)

Модельные испытания

Для судов с УСЕК и без УСЕК были выполнены буксировочные и самоходные испытания, замеры поля скоростей в месте расположения гребного винта (ГВ), а также мореходные испытания. В процессе испытаний использовались два различных способа подачи воздуха в рецесс: только к редану, к редану и ко всем поперечным козырькам. Забегая вперед, отметим, что для морских судов, зачастую испытывающих интенсивную качку, выбран второй способ подачи воздуха. Суммарный расход воздуха составлял 0,6 л/с.

Испытания на тихой воде

Испытания на тихой воде выполнялись на крупномасштабных моделях (рис. 2) при трех значениях осадки, соответствующих перевозке судном угля или руды ($d = 13,0$ м), контейнеров ($d = 10,06$ м) и зерна ($d = 8,28$ м), а также балластному переходу с начальной посадкой судна «на ровный киль» ($d = 8,41$ м) и балластному переходу с традиционным начальным дифферентом на корму ($d_k = 9,42$ м, $d_n = 6,75$ м), обеспечивающим необходимое заглубление гребного винта.

При испытаниях проводилась подводная видеосъемка. Для получения корректных результатов испытания выполнялись по сути на одной модели: сначала на модели с УСЕК, затем элементы устройства демонтировались, рецесс заделывался «заподлицо» с днищем и выполнялись испытания традиционного (без УСЕК) аналога.

Модельные испытания УНК с УСЕК на тихой воде показали, что выбранные расчетным путем параметры рецесса обеспечивают при любом варианте загрузки судна и при балластном переходе с начальной посадкой на «ровный киль» создание и сохранение единых воздушных каверн во всем расчетном диапазоне скоростей хода ($v \leq v_{\max}$, где v_{\max} — максимальная скорость при использовании полной мощности ГД) при допустимых значениях начального крена и дифферента судна. При этом единые каверны практически покрывают всю площадь рецесса. Фотографии каверн приведены на рисунке 3.

Можно видеть, что с увеличением скорости амплитуда волнового профиля каверн возрастает. При $v > v_{\max}$ вершины волн поверхности каверны касаются поперечных козырьков, и единая каверна распадается на систему отдельных каверн. Выигрыш в сопротивлении при этом заметно падает.

По результатам модельных испытаний на тихой воде выполнен расчет потребной мощности ГД сравниваемых натуральных судов (P_s) в зависимости от скорости хода (v_s) для разных случаев загрузки. Эти зависимости при максимальной загрузке судна ($d = 13,0$ м) приведены на рисунке 4.

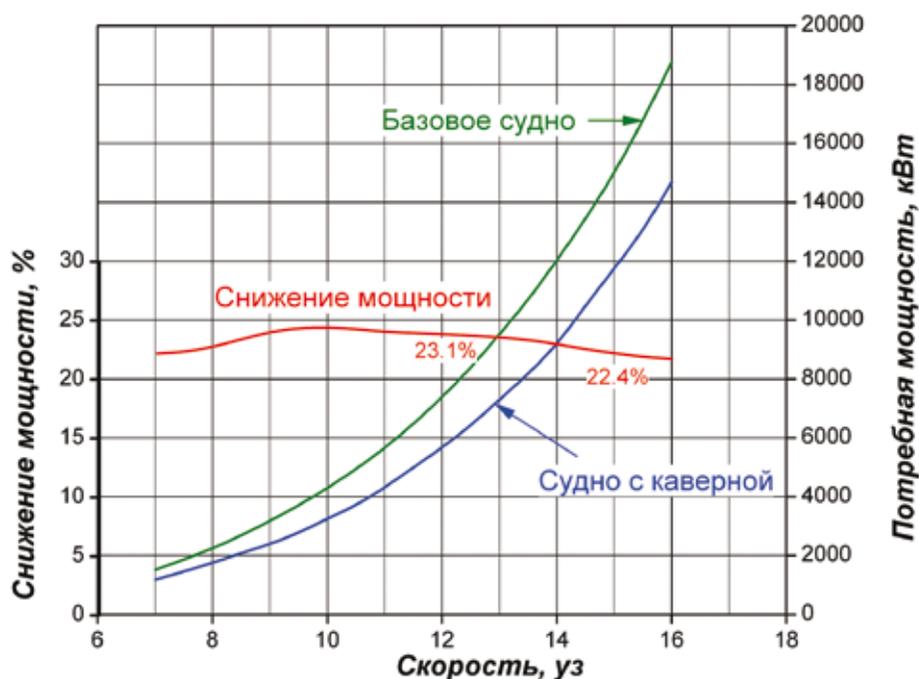
РИС. 4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ P_s И СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБНОЙ МОЩНОСТИ ΔP_s ОТ СКОРОСТИ УНК НА ТИХОЙ ВОДЕ

ТАБЛИЦА 2. ПОТРЕБНАЯ МОЩНОСТЬ ГД И СУММАРНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА СЭУ

Вариант загрузки судна	Потребная мощность ГД			Суточный расход топлива СЭУ		
	без УСЕК (P_S) _Б , кВт	с УСЕК (P_S) _У , кВт	$\Delta PS=(P_S)_Б-$ (P_S) _У , кВт/%	без УСЕК (G) _Б , т/сут.	с УСЕК (G) _У , т/сут.	$\Delta G=(G)_Б-(G)_У$, т/сут./%
Скорость 12 уз.						
Перевозка угля	7374	5667	1707/23,1	38,6	32,51	6,09/15,8
Перевозка зерна/балластный переход	6008	4365	1643/27,3	32,77	26,95	5,82/17,8
Скорость 15 уз.						
Перевозка угля	14 978	11 753	3225/21,5	71,08	58,51	12,57/17,7
Перевозка зерна/ балластный	13 898	10 456	3442/24,8	66,47	52,97	13,5/20,3

Необходимо подчеркнуть, что снижение потребной мощности ГД при создании каверны обусловлено не только уменьшением гидродинамического сопротивления корпуса, но и повышением пропульсивного коэффициента за счет более высокого КПД винта (благодаря его меньшей нагрузке по упору).

Отсюда следует, что при использовании УСЕК в обязательном порядке необходимо проектировать свой оптимальный гребной винт, отличающийся от оптимального винта традиционного судна. Оптимизация винта для УНК с УСЕК осуществлялась путем изменения шага винта при сохранении его диаметра и частоты вращения по традиционному аналогу.

Из приведенных на рисунке 4 данных видно, что создание единых каверн позволяет значительно снизить потребную мощность и расход топлива ГД во всем расчетном диапазоне скоростей хода. На расчетной скорости в 15 уз. потребная мощность судна с УСЕК составляет $(P_S)_У = 11754$ кВт, без УСЕК $(P_S)_Б = 14978$ кВт.

На основе этих данных и с учетом 15-процентного «морского» запаса произведен выбор главных двигателей одного производителя (фирмы Wärtsilä):

- для УНК с УСЕК типа RT-flex 58 мощностью 13 560 кВт;
- для УНК без УСЕК типа RT-flex 68 мощностью 17 250 кВт.

Оценка суммарного расхода топлива главной и вспомогательной судовой энергетической установки (СЭУ) выполнена с учетом увеличения расхода топлива приводных

двигателей дизель-генераторов УНК с УСЕК (на 1,2 т/сут.), обусловленного работой компрессора СПВ.

Сводные данные по потребной мощности ГД и суммарному расходу топлива СЭУ для двух случаев загрузки судна и при балластном переходе с начальной посадкой «на ровный киль» приведены в таблице 2 при двух значениях скорости хода.

К данным таблицы 2 уместно сделать следующие комментарии.

Первое. Приведенные данные по топливосберегающему эффекту соответствуют судну из постройки. В процессе эксплуатации они возрастают за счет меньшего негативного влияния обрастания, коррозии и деформации корпуса, т.к. площадь поверхности корпуса, контактирующей с водой, у судна с УСЕК примерно на 30% меньше, чем у традиционного аналога. Этот дополнительный эффект особенно весом у судов, эксплуатирующихся в теплых морях.

Второе. Приведенные данные соответствуют идеальному случаю посадки судна на «ровный киль». Близкие значения топливосберегающего эффекта достигаются и в том случае, когда начальный крен и дифферент судна не превышают допустимые значения, принятые в расчетах по определению оптимальных параметров рецесса.

Однако эти допустимые значения весьма невелики:

- допустимый крен $\theta \leq 2^\circ$ (перепад осадками по бортам УНК составляет 1,0 м), это требование практически всегда выполняется;
- допустимый дифферент (по

перепаду осадок носом и кормой) должен составлять на корму $\Delta d_k = d_k - d_n \leq 0,5$ м, на нос $\Delta d_n = d_n - d_k \leq 0,3$ м.

Выполнение жестких требований по допустимому дифференту на первый взгляд может показаться затруднительным. Однако речь идет о требованиях к начальной, перед выходом в рейс, посадке судна. Такие требования (для УНК, например, перепад осадками кормой и носом не должен превышать $\Delta d_k = 0,2 \pm 0,3$ м) могут быть выполнены без особых затруднений с использованием штатной балластной системы, учитывая, что современные суда оснащаются высокоточной системой контроля осадок носом, кормой и по бортам на миделе. При необходимости на судне можно предусмотреть специальные балластные цистерны для тонкой корректировки его посадки. При движении судна ходовой дифферент изменяется прежде всего в результате расходования топлива, однако этот процесс является весьма медленным: разница в осадках носом и кормой возрастает всего примерно на 3 см в сутки. Поэтому для поддержания нужной посадки судна в течение рейса достаточно выполнять корректирующие балластирования раз в несколько суток (в соответствии с инструкцией). Можно сказать, что обеспечение требуемой посадки судна с УСЕК — это вопрос дисциплины и привычки экипажа. Весьма важным является вопрос об оптимальной балластировке порожнего судна.

При балластном переходе с начальным дифферентом на корму ($\Delta d_k = 9,42 - 6,75 = 2,67$ м) длины со-



Без устройства



С устройством

РИС. 5. ИЛЛЮСТРАЦИЯ ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ГРЕБНОГО ВИНТА ОТ ПОПАДАНИЯ ВОЗДУХА

храняющихся в рецессе отдельных каверн невелики, а сопротивление оказывается примерно на 5% больше, чем у традиционного аналога. При балластировке порожнего судна примерно на «ровный киль» создание единой каверны обеспечивает снижение потребной мощности ГД на 26,5% по сравнению с традиционным аналогом с начальным дифферентом $\Delta d_k = 2,67$ м.

Отсюда следует, что для судов с УСЕК балластную систему необходимо проектировать так, чтобы обеспечить начальную посадку судна примерно на «ровный киль» при всех расчетных случаях загрузки. Как правило, это требование оказывается вполне выполнимым.

В аварийном режиме движения судна с УСЕК без воздуха в рецессе его осадка увеличивается, а сопротивление возрастает на 20-30%. При движении на тихой воде и умеренном волнении потеря воздуха в рецессе является маловероятной, поскольку она может произойти только из-за одновременного выхода из строя как основного, так и резервного компрессора СПВ.

В процессе испытаний моделей УНК с УСЕК был получен еще один важный результат. По предложению А.В. Сверчкова был разработан новый, более эффективный по сравнению с ранее использовавшимся вариант устройства для защиты гребного винта одновального судна от попадания пузырьков воздуха, уносимых из каверн. Об эффективности этого устройства можно судить по фотографиям, приведен-

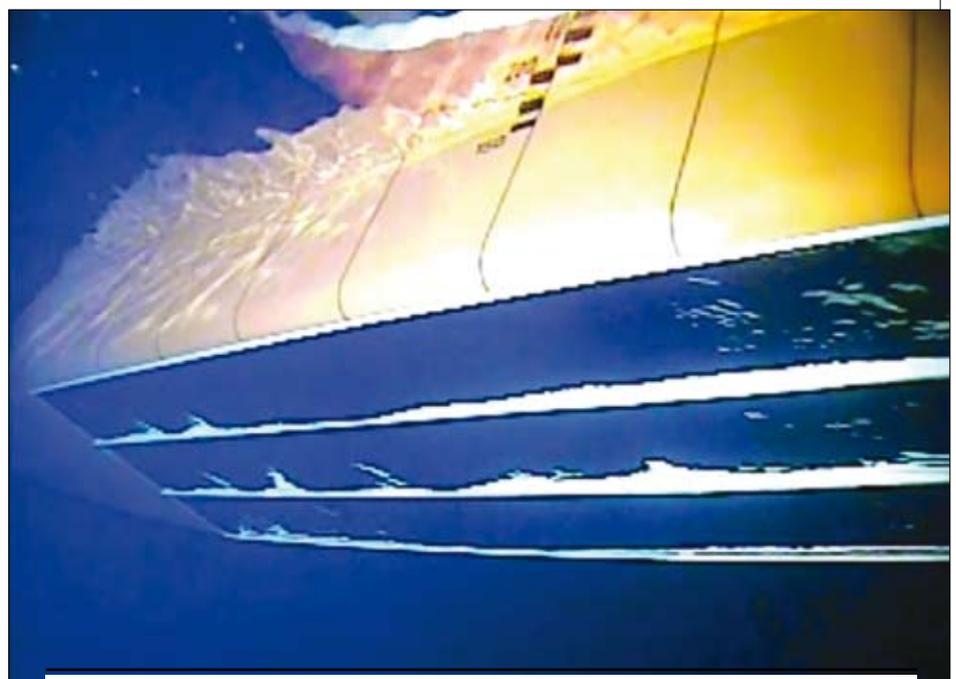
ным на рисунке 5: без защитного устройства пузырьки воздуха даже при отсутствии гребного винта проходят через зону его расположения, установка же защитного устройства обеспечивает работу винта без прососа воздуха.

При движении судна на достаточно интенсивном волнении эффективность использования каверн снижается, и этот недостаток УСЕК является неустранимым.

В результате качки судна амплитуда волнового профиля единой каверны возрастает, зазор между поверхностью каверны и днищем рецесса уменьшается. При некотором «критическом» волнении

(зависящем прежде всего от водоизмещения и осадки судна) единая каверна разрушается, распадаясь на систему отдельных каверн, длины которых изменяются (пульсируют) в соответствии с качкой судна. Эффект снижения сопротивления от использования УСЕК при этом заметно снижается. По мере усиления волнения длины отдельных каверн сокращаются, и в конце концов эффект становится отрицательным.

При мореходных испытаниях модели УНК (испытания проводились на модели меньшего масштаба при максимальной загрузке судна) единые воздушные каверны

РИС. 6. ФОТОГРАФИЯ ЕДИНЫХ КАВЕРН НА ДНИЩЕ МОДЕЛИ УНК ПРИ ВОЛНЕНИИ В 4 БАЛЛА ($h_{3\%} = 2,0$ м). ЕДИНЫЕ КАВЕРНЫ ПОКРЫВАЮТ ВСЬ РЕЦЕСС

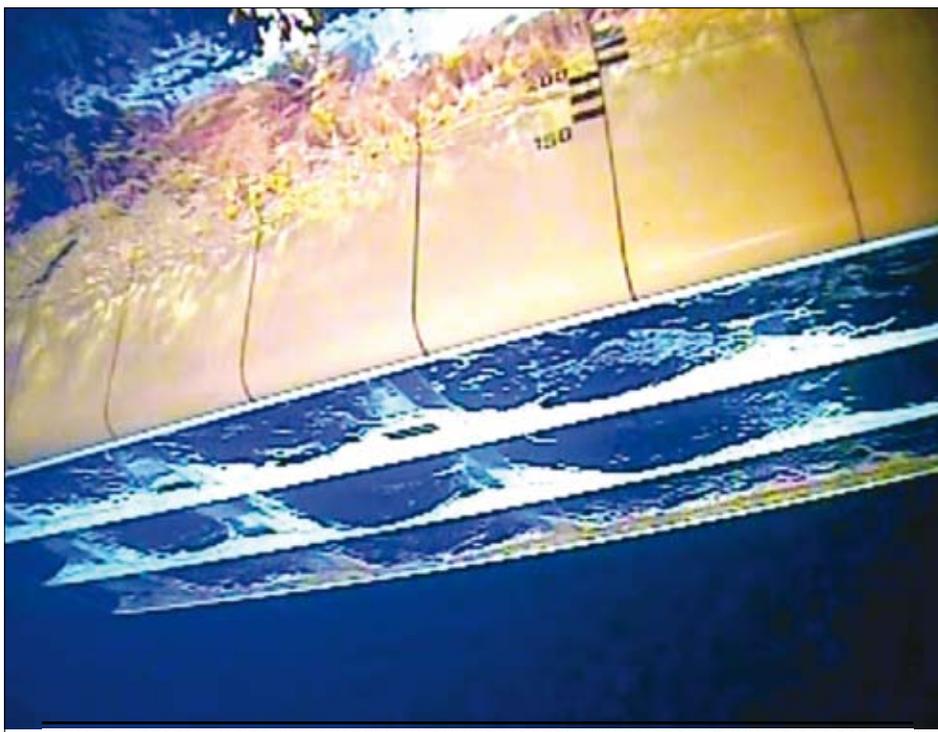


РИС. 7. ФОТОГРАФИЯ ЕДИНЫХ КАВЕРН НА ДНИЩЕ МОДЕЛИ УНК ПРИ ВОЛНЕНИИ В 5 БАЛЛОВ ($h_{3\%} = 3,5$ м). ПОЯВЛЯЮТСЯ ЗАМЫВЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЗЫРЬКОВ

сохраняются во всем диапазоне скоростей при волнении до 4 баллов включительно, покрывая всю площадь рецесса (рисунок 6). Эффективность использования каверн при этом практически такая же, как на тихой воде.

При волнении в 5 баллов ($h_{3\%} = 3,5$ м) единые каверны во всех продольных секциях рецесса также сохраняются, однако из-за роста амплитуды волнового профиля каверны периодически появляются замывы участков днища и поперечных козырьков (рисунок 7). Эффект снижения потребной мощности ГД уменьшается примерно на 20%.

При волнении примерно в 6 баллов ($h_{3\%} = 6,0$ м) единые каверны разрушаются, однако сохраняющаяся в рецессе система отдельных каверн достаточно большой протяженности обеспечивает положительный эффект, правда, примерно на 40% меньший, чем на тихой воде. При волнении в 7 баллов эффект по сравнению с тихой водой сокращается на 90%, и подачу воздуха в рецесс, видимо, целесообразно прекращать.

При прекращении подачи воздуха в рецесс приводится в действие устройство, позволяющее умень-

шить возникающий при этом рост сопротивления судна примерно в два раза.

При более сильном волнении эффект становится отрицательным, однако увеличение сопротивления и расхода топлива при этом не будет значительным, поскольку в балансе сил сопротивления доминирующим становится дополнительное волновое сопротивление. Понятно, что осредненный годовой эффект от использования УСЕК будет зависеть от повторяемости волнения различной интенсивности на конкретной линии эксплуатации судна (подробнее см. ниже).

Влияние УСЕК на массу порожнем, строительную стоимость и грузоподъемность судна

При использовании УСЕК масса судна порожнем неизбежно возрастает как за счет увеличения массы корпуса, так и из-за появления дополнительной системы подачи воздуха в рецесс. Основными составляющими увеличения массы корпуса являются элементы УСЕК (прежде всего мощные продольные кили и

вертикальные стенки по периметру рецесса), увеличение высоты борта для сохранения вместимости трюмов по традиционному аналогу, а также дополнительные подкрепления корпуса для снижения концентраций напряжений по периметру рецесса. Эти изменения одновременно приводят к повышению стандарта прочности корпуса судна с УСЕК, что позволяет минимизировать рост его массы за счет уменьшения размеров отдельных связей.

В итоге увеличение массы корпуса УНК составило 263 т. Масса СПВ – 34 т.

Однако с учетом снижения массы менее мощного ГД в результате оказалось, что масса порожнем УНК при использовании УСЕК возрастает всего примерно на 60 т.

Увеличение строительной стоимости судна при использовании УСЕК оказывается незначительным – менее 1% (с учетом меньшей стоимости ГД).

При оценке изменения грузоподъемности УНК с УСЕК учитывался не только рост массы судна порожнем, но и уменьшение запаса топлива. У традиционного (без УСЕК) УНК запас топлива для обеспечения заданной дальности плавания в 16 000 миль определен в 2062 т. Оценка возможного снижения запаса топлива при использовании УСЕК в определенной степени условна, т.к. экономия топлива зависит от характеристик волнения на конкретных линиях эксплуатации. Примем, что за счет использования УСЕК запас топлива можно снизить примерно на 13%.

С учетом этого фактора грузоподъемность УНК с УСЕК не снизится, а незначительно (примерно на 250 т) возрастет.

В случае если по путевым условиям на отдельных линиях эксплуатации имеется возможность несколько повысить осадку судна, то при использовании УСЕК появляется дополнительный резерв увеличения грузоподъемности благодаря большей на 1,0 м высоте борта. Грузовая марка судна с УСЕК назначается РМРС применительно к аварийному случаю, когда воздух в рецессе отсутствует. Осадка судна

при этом возрастает на величину $\Delta d' = V_p / S_{WL}$, где V_p — объем рецесса, S_{WL} — площадь ватерлинии. Для УНК $\Delta d' = 0,54$ м. Таким образом, по сравнению с традиционным аналогом высота борта УНК с УСЕК увеличена на 1,0 м, а осадка без воздуха в рецессе при одинаковой загрузке возрастает на 0,54 м. В результате при одинаковом отстоянии грузовых марок от главной палубы осадка судна с УСЕК без воздуха в рецессе может быть увеличена на 0,46 м.

По этой причине при перевозке руды, когда трюмы заполняются не полностью и увеличения их объемов не требуется, рост грузоподъемности УНК с УСЕК за счет увеличения осадки на 0,46 м можно оценить примерно в 3100-3200 т.

При перевозке угля и тем более зерна для большего количества груза потребуется увеличить высоту комингсов грузовых люков, что приведет к некоторому уменьшению прироста грузоподъемности. Не вдаваясь в детальные расчеты, отметим лишь, что за счет увеличения осадки УНК имеется принципиальная возможность повысить его грузоподъемность примерно на 4÷4,5%, если позволяют путевые условия. Следует отметить интересную деталь: при наличии воздуха в рецессе грузовая марка и при повышенной грузоподъемности судна будет находиться выше ватерлинии.

Оценивая безопасность плавания судов с УСЕК, следует подчеркнуть, что наличие рецесса ведет к значительному снижению амплитуды бортовой качки судна при больших наклонениях, когда большая часть воздуха из рецесса стравливается в атмосферу. В этом случае продольные кили и бортовые стенки рецесса выполняют роль пассивных успокоителей качки подобно скуловым киям традиционных судов. Этот эффект, а также большая высота надводного борта и лучшая защищенность днища рецесса от повреждений при посадке на мель или столкновении с подводным препятствием обуславливают более высокий уровень безопасности плавания судов с УСЕК. Управляемость судна при использовании УСЕК не ухудшается.

Оценка изменения эксплуатационных расходов на ремонт и поддержание технического состояния судна при использовании УСЕК носит только качественный характер ввиду отсутствия фактических данных. При использовании УСЕК можно ожидать некоторого снижения затрат по корпусным работам благодаря тому, что днище рецесса в значительно меньшей степени подвержено повреждениям, коррозии и обрастанию. Некоторого увеличения затрат можно ожидать по обслуживанию и ремонту системы подачи воздуха в рецесс.

Результаты технико-экономического анализа эффективности использования УСЕК

Эффект от использования УСЕК может быть реализован двумя способами:

— вариант «Экономия топлива», когда скорость сравниваемых судов (с УСЕК и без УСЕК) принимается одинаковой, а потребная мощность и расход топлива ГД отличаются;

— вариант «Увеличение скорости», когда мощность ГД принимается одинаковой, а скорость хода различается. Предварительные оценки однозначно показали, что при перевозке низкотарифицированных навалочных грузов предпочтителен вариант «Экономия топлива». Технико-экономический анализ выполнялся специалистами ЗАО «ЦНИИМФ» применительно к четырем линиям эксплуатации: Новороссийск — Дамьетта (Египет), перевозка зерна; Мурманск — Иммингем (Великобритания), перевозка угля; Ванино — Циньхуандао (Китай), перевозка угля; Тамань — Сан-Пауло (Бразилия), перевозка удобрений. В обратном направлении по всем линиям предусмотрена частичная (50%) загрузка контейнерами. При оценке экономических показателей работы сравниваемых судов (с УСЕК и без УСЕК) полагалось, что время кругового рейса, в том числе время хода за рейс, среднее количество рейсов за год, фрахтовые ставки на перевозку

грузов и стоимость топлива одинаковы при работе на каждой из рассмотренных линий. Практически одинаковыми принимались и постоянные составляющие структуры расходов (различия в затратах на техническую эксплуатацию судна с УСЕК принимались на 0,2% больше, чем у традиционного аналога). Различия в количестве перевозимого навалочного груза, обусловленное незначительным увеличением грузоподъемности судна с УСЕК (осадка сравниваемых судов принималась одинаковой), не превышало 0,6%. Таким образом, различие в финансовых результатах сравниваемых судов для каждой линии определялось в основном разными расходами на топливо. Цена на дизельное топливо принята на основании средней стоимости в российских портах в период с октября 2013 г. по февраль 2014 г. соответственно в размере \$890 за тонну.

При выполнении экономического анализа главная сложность состояла в учете влияния волнения на эффективность использования устройства при работе судна на конкретных линиях. С этой целью А.С. Буяновым была разработана математическая модель, базирующаяся на результатах мореходных испытаний и статистических данных по волнению в морях и океанах. Суть этой модели состоит в следующем. Каждая линия эксплуатации разбивается на ряд участков согласно классификации справочника, на которых характеристики волнения относительно стабильны. Для осредненной интенсивности волнения в конкретном районе для каждого месяца года по результатам мореходных испытаний модели оценивалась достижимая скорость судна с УСЕК при использовании 85% МДМ. Таким способом для конкретной линии эксплуатации по каждому району и месяцам года составлялась матрица скорости движения судна, а по протяженности районов определялось время хода судна в этом районе. Расход топлива при движении УНК с УСЕК по конкретному району линии эксплуатации определялся при 85% использовании МДМ, а базового судна без УСЕК — по зна-

ТАБЛИЦА 3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ СРАВНИВАЕМЫХ СУДОВ

Линия эксплуатации	Протяженность, миль	Время кругового рейса, сут.	Доля ходового времени, %	Среднее количество рейсов за год, ед.	Расход топлива СЭУ на ходу за рейс, т		Снижение расхода топлива СЭУ при работе УСЕК, т	
					без УСЕК	с УСЕК	за сутки	за год
Ванино – Циньхуандао	1638	15,3	61,4	21	580,4	468,4	11,91	2352
Новороссийск – Дамьетта	1227	13,8	50,7	24	429,8	346,6	11,88	1997
Мурманск – Иммингем	1563	16,1	63,4	20	599,9	497,1	10,08	2040
Тамань – Сан-Пауло	6621	46,4	89	6	2628	2279	7,52	2094

чениям мощности ГД, необходимой для достижения той же скорости, что у судна с УСЕК. Поскольку при продолжительной работе судна на линии оно может проходить одни и те же районы маршрута в разные периоды года с отличающимся ветро-волновым режимом, для получения корректных результатов моделирование работы судна на конкретной линии эксплуатации осуществлялось за период 10 лет.

Сводные данные по эксплуатационным показателям сравниваемых судов при работе на расчетных линиях приведены в таблице 3.

Оценивая приведенные в таблице 3 данные, можно выделить два фактора, влияющих на финансовый результат. Очевидно, что при прочих равных условиях финансовый результат от использования УСЕК будет тем выше, чем больше доля ходового времени в общей продолжительности рейса. В этом отношении самая протяженная линия Тамань – Сан-Пауло наиболее предпочтительна.

Второй фактор – ветро-волновой режим на линии эксплуатации: чем он суровее, тем меньше топливосберегающий эффект и конечный финансовый результат.

Наиболее суровый ветро-волновой режим наблюдается на линии Тамань – Сан-Пауло, где значительная часть маршрута приходится на Атлантический океан.

На этой линии суточная экономия топлива СЭУ за счет использования УСЕК при использовании 85% МДМ главного двигателя составляет 60% от идеального случая движения

судна на тихой воде, а на линиях Ванино – Циньхуандао – 95,6%, Новороссийск – Дамьетта – 94,7%, Мурманск – Иммингем – 80,2%.

Экономические показатели

работы сравниваемых судов на расчетных линиях эксплуатации приведены в таблице 4.

Можно заметить, что использование предлагаемой топливосбере-

ТАБЛИЦА 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СРАВНИВАЕМЫХ СУДОВ

Показатель	Базовый УНК	УНК с УСЕК	Эффект от внедрения УСЕК	
			ед. изм.	%
Ванино – Циньхуандао				
Объем перевозок, тыс. т	1424,2	1433,3	9,1	0,6
Расходы, млн. руб.	432,7	373,0	-59,8	-13,8
Доходы, млн руб.	839,8	842,3	2,5	0,3
Финансовый результат, млн руб.	407,0	469,4	62,4	15,3
Срок окупаемости, лет	10,5	9,1	-1,4	-13,3
Новороссийск – Дамьетта				
Объем перевозок, тыс. т	1182,0	1192,4	10,4	0,9
Расходы, млн руб.	395,6	344,8	-50,7	-12,8
Доходы, млн руб.	1093,7	1098,8	5,1	0,5
Финансовый результат, млн руб.	698,1	753,9	55,8	8,0
Срок окупаемости, лет	6,1	5,7	-0,4	-7,4
Мурманск – Иммингем				
Объем перевозок, тыс. т	1356,4	1365,1	8,6	0,6
Расходы, млн руб.	425,6	373,3	-52,3	-12,3
Доходы, млн руб.	843,8	846,5	2,7	0,3
Финансовый результат, млн руб.	418,2	473,2	55,0	13,1
Срок окупаемости, лет	10,3	9,1	-1,2	-11,6
Тамань – Сан-Пауло				
Объем перевозок, тыс. т	406,9	409,5	2,6	0,6
Расходы, млн руб.	582,1	514,4	-67,7	11,6
Доходы, млн руб.	663,0	665,8	2,8	0,4
Финансовый результат, млн руб.	80,9	151,4	70,5	87,2
Срок окупаемости, лет	33,8	18,0	-15,7	-46,6

гающей технологии обеспечивает значительный экономический эффект на всех расчетных линиях эксплуатации. Наибольшая величина достигается на наиболее протяженной линии Тамань – Сан-Пауло с максимальной долей расходов на топливо в общей структуре расходов.

Следует признать, что приведенная оценка финансового результата от использования УСЕК является приближенной по следующим причинам.

Во-первых, она базируется на данных мореходных испытаний модели только при максимальной осадке. При перевозке зерна, контейнеров и в балластном переходе можно ожидать несколько большего негативного влияния волнения из-за меньшей осадки судна. С другой стороны, установлено, что при движении на тихой воде и на умеренном волнении топливосберегающий эффект с уменьшением осадки возрастает в силу меньшей площади смоченной поверхности корпуса. Видимо, эти два фактора будут в определенной степени уравновешивать друг друга.

Во-вторых, приведенная оценка базируется на данных испытаний на встречном волнении. Вопрос о наиболее неблагоприятном курсовом угле при движении судна с УСЕК на волнении остается не вполне ясным.

По данным модельных испытаний УНК с УСЕК, оказалось, что при скоростях хода, соответствующих использованию 85% МДМ главного двигателя, наиболее неблагоприятным является косое волнение (курсовой угол $\chi = 135^\circ$), а при меньших скоростях – встречное (курсовой угол $= 180^\circ$). При движении модели лагом к волне снижение эффективности УСЕК оказывается минимальным. Понятно, что определить некий «осредненный за рейс» курсовой угол судна не представляется возможным, и достоверную оценку влияния этого фактора можно получить лишь по опыту эксплуатации натуральных судов.

Следует отметить, что указанные факторы могут сказаться на величине финансового результата в основном при работе судна с УСЕК на линиях с суровым ветро-волновым режимом. Для линий Ванино – Циньхуандао и Новороссийск – Дамьетта эти нюансы вряд ли окажут заметное влияние на финансовый результат, поскольку на этих линиях волнение на протяжении большей части года незначительно: среднегодовая повторяемости волнения силой до 4 баллов включительно, когда единая каверна сохраняется при всех курсовых углах, а топливосберегающий эффект оказывается практически такой же, как на тихой воде, составляет соответственно 68% и 73%. Повторяемость

волнения силой до 5 баллов, когда эффект сохраняется на достаточно высоком уровне, на этих линиях составляет соответственно 93% и 96%.

Необходимо также учитывать, что на финансовый результат от использования этой технологии помимо двух отмеченных доминант (доля ходового времени и ветро-волновой режим) оказывает влияние целый ряд факторов. Главным из них является стоимость бункера. При снижении стоимости дизельного топлива (в настоящее время существует такая тенденция) или при замене дизельного на более тяжелое топливо величина экономического эффекта от использования предлагаемой технологии будет снижаться.

Представляется, что полученные к настоящему времени результаты экспериментальных исследований и проектных проработок дают основания утверждать, что использование разработанного устройства на тихоходных водоизмещающих судах обеспечивает в реальных условиях эксплуатации топливосберегающий и экологический эффект такого уровня, который недостижим иными применяемыми в мировом судостроении технологиями.

Накопленный опыт позволяет с уверенностью рекомендовать предлагаемое устройство для использования на морских крупнотоннажных судах. **МФ**

Источники

1. Бутузов А.А., Горбачев Ю.Н., Иванов А.Н., Эллер А.О. «Судно с воздушной прослойкой под днищем». Патент РФ № 1145587, 1996.
2. Горбачев Ю.Н., Старобинский В.Б., Федоров Е.П. «Натурные испытания судна с устройством для снижения расхода топлива». Ж. «Речной транспорт», № 6, 1990.
3. Бутузов А.А., Горбачев Ю.Н., Иванов А.Н., Калужный В.Г., Павленко А.Н. «Снижение сопротивления движению судов за счет искусственных газовых каверн». Ж. «Судостроение», № 11, 1996.
4. Пустошный А.В., Сверчков 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», вып. 69 (353), 2012.
5. Горбачев Ю.Н., Буянов А.С., Сверчков А.В. «Как доступными средствами повысить энергоэффективность и экологическую безопасность речного флота». Ж. «Речной транспорт», № 6, 2014.
6. Пустошный А.В., Сверчков А.В., Горбачев Ю.Н. «Судно с воздушной каверной на днище». Патент РФ №2530905, 2013.
7. Басин А.М., Бутузов А.А., Иванов Д.Н. «Устройство от защиты от попадания на гребной винт». Авторское свидетельство № 217980, 1966.
8. Бюллетень «Промышленные грузы». URL: <http://www.pg-online.ru/>.
9. Официальный сайт компании «Торговый дом «Масла и смазки». URL: <http://www.spbtdms.ru/index.htm/>.
10. «Ветер и волны в океанах и морях» Справочные данные, Регистр СССР, 1974.