

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ДИФФЕРЕНТА СУДОВ «РЕКА – МОРЕ»

А. А. Ершов, В. В. Мищенко

*Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Предложено теоретическое обоснование использования оптимального дифферента судов «река – море» с целью улучшения ходкости судов различных типов и назначений, осуществляющих плавание по морским и речным участкам. Проведен анализ поиска оптимального дифферента для различных типов судов, находящихся в эксплуатации. Приведены расчеты, доказывающие возможность проектирования новых судов с улучшенными ходовыми характеристиками. Проиллюстрирована схема гашения носовой поперечной волны, идущей от форштевня судна «река – море», с использованием поперечной волны, идущей от носового бульба, при дифференте на нос. Доказано, что дифферентование судна «река – море» без носового бульба на нос эффективно для тихоходных и быстроходных судов за счет снижения составляющих и общего сопротивления, по сравнению с сопротивлением движению судна с обычным дифферентом. Предложен интеграл, аналогичный интегралу Мичелла для волнового сопротивления судна с носовым бульбом, посредством которого определены условия гашения носовой поперечной волны (идущей от форштевня) с использованием носового бульба судна «река – море». Подробно исследуются составляющие сопротивления движению судна: суммарное сопротивление среды движению судна, сопротивление трения, формы, выступающих частей, волновое, аэродинамическое сопротивление. Рассматриваются критерии оптимальной осадки судна носом и оптимального дифферента судна, критерии эффективности использования оптимального дифферента для судов «река – море» на морских участках перехода. Приведено уравнение, определяющее значение оптимальной длины волнообразующей части носового бульба или условие оптимального дифферента. Представлены фотоматериалы, иллюстрирующие пример бульба морского судна, носовая часть которого способна эффективно формировать поперечную волну при заданном дифференте. Сделаны выводы о возможности использования оптимального дифферента для судов «река – море» на речных и морских участках перехода, приведены рекомендации, способствующие экономии топлива и времени, увеличению скорости до двух узлов при снижении общего сопротивления на величину до 20 %.

Ключевые слова: оптимальный дифферент судна, теоретические основы, использование оптимального дифферента для улучшения ходкости, сопротивление среды движению судна, высота волны.

Для цитирования: *Ершов А. А., Мищенко В. В.* Теоретические основы определения оптимального дифферента судов «река – море» // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 40–51. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-40-51.

Введение

Задача определения оптимального традиционного дифферента связана с вопросами улучшения ходкости судов различных типов. Для судов типа «река – море» эта проблема имеет особую актуальность вследствие того, что суда данного типа могут проводить часть рейса в условиях речного плавания, а часть – при морских переходах. Условия плавания на реках, как правило, сопровождаются отсутствием волнения, однако характеризуются влиянием мелководья, ветра и течения. Морские участки перехода судна «река – море» могут сопровождаться морским волнением значительной интенсивности, движением на глубокой воде в условиях ветра.

В последнее время усилия исследователей направлены в основном на поиски путей улучшения ходовых характеристик морских судов в условиях шторма [1–6].

Опыт практического поиска оптимального дифферента экипажами морских и речных судов свидетельствует о том, что незначительный дифферент на нос улучшает ходовые характеристики судна – увеличивает скорость судна, снижает расход топлива. В отдельных случаях

увеличение дифферента на нос морских судов приводило к значительному увеличению скорости (до 1–2 уз), по сравнению с традиционным дифферентом судна на корму. Увеличение дифферента на нос позволяло не только улучшать характеристики ходкости и снижать расход топлива, но и уменьшать ходовое время судна, что приводило к существенным экономическим выгодам для всех участников транспортного процесса.

Попытки теоретического обоснования оптимального дифферента судна предпринимались в работе [7]. Обращалось внимание на снижение сопротивления формы при увеличении дифферента судна на нос. Однако комплексного теоретического обоснования оптимального дифферента судна с целью использования для улучшения ходкости судов различных типов и назначений до сих пор нет. Отсутствие теории затрудняет поиск оптимального дифферента для различных типов судов, включая суда «река – море», а также ограничивает теоретические основы проектирования новых судов с улучшенными ходовыми характеристиками. Решению вышеперечисленных проблем посвящена настоящая статья.

Методы и материалы исследования

Ходовые характеристики судов, включая суда «река – море», определяются способностью преодолевать сопротивление среды движению судна. Составляющие сопротивление движению судна могут быть представлены следующим образом:

$$R_{\Sigma} = R_T + R_{\Phi} + R_W + R_{Вч} + R_A,$$

где R_{Σ} – суммарное сопротивление среды движению судна, кН; R_T – сопротивление трения, кН; R_{Φ} – сопротивление формы, кН; R_W – волновое сопротивление, кН; $R_{Вч}$ – сопротивление выступающих частей, кН; R_A – аэродинамическое сопротивление, кН.

Вклад каждой из составляющих сопротивления среды движению судна оценивается в зависимости от скорости и длины судна, определяемых числом Фруда:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}},$$

где v – скорость движения судна, м/с; L – длина судна, м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Величины составляющих сопротивления при обычном дифференте, на тихой воде и при штилевой погоде, в зависимости от числа Фруда, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Составляющие суммарного сопротивления среды движению судна

Составляющие суммарного сопротивления R_{Σ}	Составляющие сопротивления, %	
	Тихоходные суда (танкеры и балкеры) $Fr = 0,16-0,18$	Быстроходные суда (контейнеровозы, пассажирские) $Fr = 0,25-0,30$
Сопротивление трения R_T	70	70
Сопротивление формы R_{Φ}	24	8
Волновое сопротивление R_W	5	20
Сопротивление выступающих частей и аэродинамическое сопротивление ($R_{Вч} + R_A$)	1	2

Расчет сопротивления среды движению судна (R_{Σ}) традиционно производится с использованием коэффициентов ξ_T , ξ_{Φ} , ξ_W , определяемых экспериментально, по следующей зависимости:

$$R_{\Sigma} = (\xi_T + \xi_{\Phi} + \xi_W) \frac{\rho v^2}{2} \Omega,$$

где ξ_T – коэффициент сопротивления трения; ξ_{Φ} – коэффициент сопротивления формы; ξ_W – коэффициент волнового сопротивления; Ω – площадь смоченной поверхности судна, м²; ρ – плотность воды, кг/м³.

Рассмотрим факторы, влияющие на уменьшение составляющих сопротивления R_{Σ} при дифферентовании судна на нос.

1. Уменьшение величины суммарного сопротивления движению судна за счет снижения площади смоченной поверхности при дифференте судов «река – море» на нос.

Дифферентование судна «река – море» на нос позволяет снизить площадь смоченной поверхности Ω на 3–5 % за счет извлечения из воды кормовых обводов, обладающих большей полнотой, чем носовые обводы корпуса, которые при дифференте на нос входят в воду. Как следствие,

$$R_{\Sigma\text{дн}} = (\xi_{\text{т}} + \xi_{\text{ф}} + \xi_{\text{в}}) \frac{\rho v^2}{2} 0,95\Omega,$$

где $R_{\Sigma\text{дн}}$ – суммарное сопротивление среды движению судна с использованием дифферента на нос, кН; Ω – расчетное значение площади смоченной поверхности судна, м².

Таким образом, дифферент на нос позволяет снизить суммарную величину сопротивления среды движению судна R_{Σ} на 5 %, в зависимости от типа, обводов и характера загрузки судна «река – море».

2. Уменьшение величины суммарного сопротивления движению судна за счет снижения сопротивления формы при дифференте судов «река – море» на нос.

Увеличение дифферента на нос у судов «река – море» позволяет извлечь из воды наиболее плохообтекаемую кормовую часть корпуса судна, что приводит к уменьшению вихреобразования в кормовой оконечности и, как следствие, к снижению сопротивления формы. Особенно существенно это для судов «река – море», имеющих в кормовой оконечности значительную полноту и дополнительные источники вихреобразования – аппарели, вырезы и т. п. Анализ и практический опыт свидетельствуют, что увеличение дифферента на нос позволяет снизить сопротивление формы на 50 % от величины обычных значений при традиционном дифференте. Так, при увеличении дифферента на нос расчетное значение сопротивления формы можно рассчитывать следующим выражением:

$$R_{\text{Фдн}} = 0,5(\xi_{\text{ф}}) \frac{\rho v^2}{2} 0,95\Omega,$$

где $R_{\text{Фдн}}$ – сопротивление формы судна «река – море» с использованием дифферента на нос, кН; $\xi_{\text{ф}}$ – коэффициент сопротивления формы, полученный при традиционном дифференте.

3. Уменьшение величины суммарного сопротивления движению судна за счет снижения волнового сопротивления при дифференте на нос судов «река – море».

3.1. Снижение волнового сопротивления за счет увеличения волнообразующей длины судна при дифференте судов «река – море» на нос.

Рост дифферента судна «река – море» на нос приводит к увеличению его волнообразующей длины. Увеличение волнообразующей длины судна позволяет достичь благоприятной интерференции носовой и кормовой системы поперечных волн, что приводит к их взаимному погашению [6].

Как следствие, снижение волнового сопротивления за счет увеличения волнообразующей длины при дифферентовании судна на нос может достигать 10 % для всех судов «река – море», в том числе без носового бульба.

Таким образом, при увеличении дифферента на нос расчетное значение волнового сопротивления формы может быть определено следующим выражением:

$$R_{\text{вдн}} = 0,9(\xi_{\text{в}}) \frac{\rho v^2}{2} 0,95\Omega,$$

где $R_{\text{вдн}}$ – сопротивление формы судна «река – море» с использованием дифферента на нос, кН; $\xi_{\text{в}}$ – коэффициент волнового сопротивления, полученный при традиционном дифференте.

3.2. Снижение волнового сопротивления за счет гашения носовой поперечной волны при взаимодействии с поперечной волной от носового бульба при дифференте на нос судов «река – море».

Увеличение дифферента на нос судна «река – море», имеющего носовой бульб, приводит к тому, что носовая поперечная волна образуется в двух местах – у бульба и форштевня судна «река – море». При определенном соотношении отстояния волнообразующей части бульба от

форштевня возникает ситуация, когда поперечная волна от бульба будет гасить поперечную волну, идущую от форштевня судна «река – море», за счет благоприятной интерференции.

С целью определения условий гашения носовой поперечной волны (идущей от форштевня) с использованием носового бульба судна «река – море» может быть записан интеграл (аналогичный интегралу Мичелла [6]) для волнового сопротивления R_W :

$$R_W = \frac{4\rho g^2}{\pi v^2} \int_1^{\infty} \left(I_a^2 + (J_{\phi} + J_{\psi})^2 \right) \frac{\lambda^2}{\sqrt{\lambda^2 - 1}} d\lambda, \quad (1)$$

где

$$J_{\psi} = \int_0^{\frac{L}{2}} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{L}{2} + l_{\psi\phi}} f(x, z) e^{-px} \sin kx dx dz; \quad (2)$$

$$J_{\phi} = \int_0^{\frac{L}{2}} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x, z) e^{-px} \sin kx dx dz; \quad (3)$$

$$I_a = \int_0^{\frac{L}{2}} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{L}{2}} f(x, z) e^{-px} \cos kx dx dz, \quad (4)$$

где $y = f(x, z)$ – уравнение судовой поверхности; $p = \frac{\lambda^2}{v^2} g$; $k = \frac{g\lambda}{v^2}$; λ – переменная интегрирования интеграла (1); d – осадка судна «река – море» носом, м; $l_{\psi\phi}$ – волнообразующая длина носового бульба, на которой образуется поперечная волна от бульба, направленная на гашение носовой поперечной волны (идущей от форштевня), судна «река – море», м.

В соответствии с выражениями (1)–(3) условием гашения носовой поперечной волны с использованием носового бульба судна «река – море» является следующее выражение:

$$J_{\psi} + J_{\phi} = 0. \quad (5)$$

Выражение (5) может являться также критерием оптимальной осадки носом или оптимального дифферента судна.

Решение уравнения (5) приводит к следующему значению оптимальной длины волнообразующей части носового бульба или условию оптимального дифферента:

$$l_{\psi\phi} = \frac{\lambda_{\psi}}{2}, \quad (6)$$

где λ_{ψ} – длина поперечной волны, м.

Графическое решение уравнения (5) на рис. 1 иллюстрирует, как происходит гашение в результате благоприятной интерференции носовой поперечной волны, идущей от форштевня судна «река – море», с использованием поперечной волны, идущей от носового бульба и образованной на расстоянии $l_{\psi\phi} = \frac{\lambda_{\psi}}{2}$ от форштевня.

Анализ уравнений (1)–(4) свидетельствует, что частичное гашение носовой поперечной волны будет происходить в диапазоне

$$\lambda_{\psi} > l_{\psi\phi} > \frac{\lambda_{\psi}}{2}. \quad (7)$$

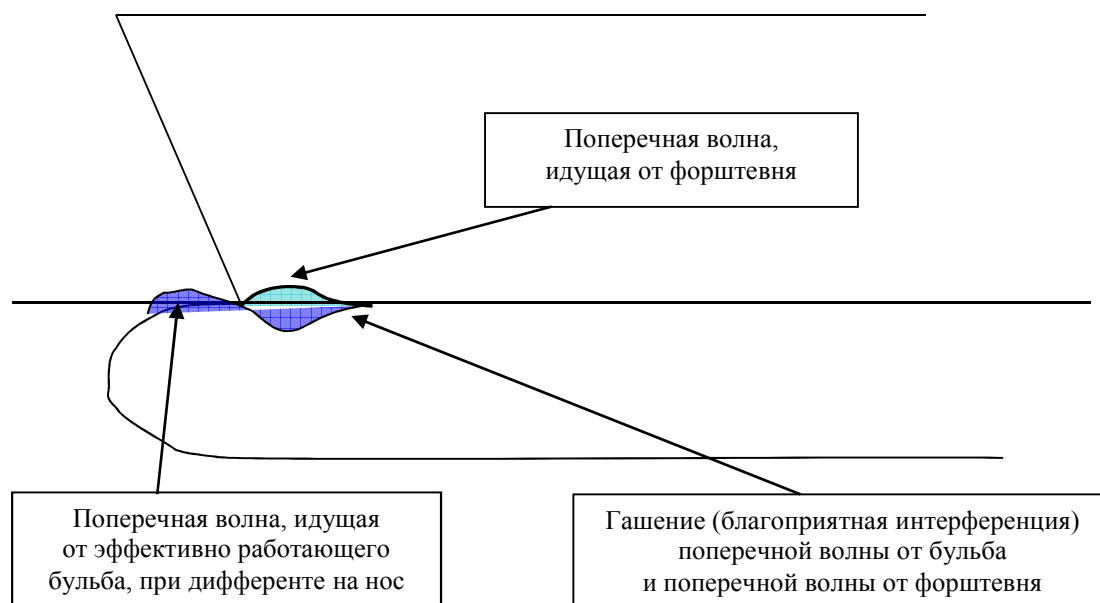


Рис. 1. Схема гашения носовой поперечной волны, идущей от форштевня судна «река – море», с использованием поперечной волны, идущей от носового бульба, при дифференте на нос

Выражение для длины поперечной волны выглядит следующим образом:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{2\pi}{g} v^2.$$

Таким образом, волнообразующая длина носового бульба судна «река – море» $l_{\text{вб}}$, направленная на гашение носовой поперечной волны, является функцией скорости судна v . Указанная зависимость делает возможным оптимизировать дифферент судна на нос, регулируя волнообразующую длину бульба, в зависимости от скорости движения судна.

Для существующих судов «река – море», изменяя осадку судна носом и, следовательно, волнообразующую длину носового бульба, можно оптимизировать дифферент в зависимости от планируемой скорости перехода.

Для перспективных судов «река – море» в соответствии с выражениями (1)–(5) проектируемый носовой бульб должен иметь конструктивную часть, позволяющую эффективно формировать носовую поперечную волну, направленную на гашение поперечной волны от форштевня при заданном дифференте судна на волнообразующей длине бульба $l_{\text{вб}}$, что подтверждают имеющиеся научные и экспериментальные данные, а также опыт эксплуатации морских и речных судов (рис. 2).

Выражения (1)–(5) подтверждают, что обеспечение эффективного гашения носовой поперечной волны от форштевня с использованием поперечной волны, образованной на волнообразующей части носового бульба, возможно только в том случае, если форма бульба и форма форштевня одинаковы. Иначе говоря, функции $f(x, z)$ в формулах (2), (3) для форштевня и бульба на длине образования поперечной волны должны совпадать. Как следствие, в формулах (2) и (3)

$$f(x, z)_{\text{ф}} = f(x, z)_{\text{б}},$$

где $f(x, z)_{\text{ф}}$ – уравнение судовой поверхности в формуле (3) на участке образования носовой поперечной волны; $f(x, z)_{\text{б}}$ – уравнение судовой поверхности в формуле (2) на участке образования носовой поперечной волны.

Уравнения (1)–(5) свидетельствуют, что достижение оптимального дифферента на нос с эффективным гашением носовой поперечной волны от форштевня с использованием поперечной волны, образованной на волнообразующей части носового бульба, позволяет снизить волновое сопротивление на 50 %. Таким образом, при достижении оптимального дифферента на

нос расчетное значение волнового сопротивления судна «река – море» с носовым бульбом можно рассчитывать:

$$R_{\text{вдн}} = 0,5(\xi_{\text{в}}) \frac{\rho v^2}{2} 0,95\Omega,$$

где $R_{\text{вдн}}$ – волновое сопротивление судна «река – море» с использованием оптимального дифферента на нос, кН.



Рис. 2. Пример бульба судна, носовая часть которого способна эффективно формировать поперечную волну при заданном дифференте: *a* – морское судно; *б* – речное судно

Оценку влияния дифферентования на нос судов «река – море» на различные составляющие сопротивления движения удобно производить при помощи модифицированной информации (см. табл. 1). Для этого информацию, представленную в табл. 1, преобразуем в виде долей общего сопротивления среды движению судна R_{Σ} (табл. 2).

Таблица 2

Составляющие суммарного сопротивления среды движению судна в долях от суммарного сопротивления R_{Σ} судна «река – море» с обычным дифферентом

Составляющие суммарного сопротивления R_{Σ}	Составляющие сопротивления	
	Тихоходные суда (танкеры и балкеры) $Fr = 0,16-0,18$	Быстроходные суда (контейнеровозы, пассажирские) $Fr = 0,25-0,30$
Сопротивление трения R_T	$0,70R_{\Sigma}$	$0,70R_{\Sigma}$
Сопротивление формы R_{Φ}	$0,24R_{\Sigma}$	$0,08R_{\Sigma}$
Волновое сопротивление R_W	$0,05R_{\Sigma}$	$0,20R_{\Sigma}$
Сопротивление выступающих частей и аэродинамическое сопротивление ($R_{Вч} + R_A$)	$0,01R_{\Sigma}$	$0,02R_{\Sigma}$
Суммарное сопротивление судна с обычным дифферентом	R_{Σ}	R_{Σ}

Составим таблицу коэффициентов уменьшения влияния составляющих сопротивления для судна «река – море» без носового бульба с дифферентом на нос в соответствии с материалами настоящей статьи (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты уменьшения составляющих суммарного сопротивления среды движению судна «река – море» без носового бульба с дифферентом на нос

Коэффициенты снижения составляющих суммарного сопротивления R_{Σ}	Составляющие сопротивления	
	Тихоходные суда (танкеры и балкеры) $Fr = 0,16-0,18$	Быстроходные суда (контейнеровозы, пассажирские) $Fr = 0,25-0,30$
Коэффициент снижения сопротивления трения R_T	1	1
Коэффициент снижения сопротивления формы R_{Φ}	0,5	0,5
Коэффициент снижения волнового сопротивления R_W	0,9	0,9
Коэффициент снижения сопротивления выступающих частей и аэродинамического сопротивления ($R_{Вч} + R_A$)	1	1

Произведем итоговый расчет снижения суммарного сопротивления для судна «река – море» без носового бульба с дифферентом на нос (табл. 4).

Таблица 4

Составляющие суммарного сопротивления среды движению судна без бульба с дифферентом на нос $R_{\Sigma ДН}$ в долях от суммарного сопротивления R_{Σ} у судна с обычным дифферентом

Составляющие суммарного сопротивления $R_{\Sigma ДН}$	Составляющие сопротивления	
	Тихоходные суда (танкеры и балкеры) $Fr = 0,16-0,18$	Быстроходные суда (контейнеровозы, пассажирские) $Fr = 0,25-0,30$
Сопротивление трения $R_{ТДН}$	$0,70R_{\Sigma}$	$0,70R_{\Sigma}$
Сопротивление формы $R_{\Phi ДН}$	$0,12R_{\Sigma}$	$0,08R_{\Sigma}$
Волновое сопротивление $R_{W ДН}$	$0,045R_{\Sigma}$	$0,18R_{\Sigma}$
Сопротивление выступающих частей и аэродинамическое сопротивление ($R_{Вч} + R_A$)	$0,01R_{\Sigma}$	$0,02R_{\Sigma}$
Суммарное сопротивление судна с дифферентом на нос $R_{\Sigma ДН}$	$0,875R_{\Sigma}$	$0,94R_{\Sigma}$
Суммарное сопротивление судна с дифферентом на нос с учетом уменьшения площади смоченной поверхности Ω	$0,831R_{\Sigma}$	$0,893R_{\Sigma}$

Как следует из результатов расчетов, представленных в табл. 4, дифферентование судна без носового бульба на нос эффективно как для тихоходных, так и для быстроходных судов «река – море» и приводит к значительному снижению сопротивления, по сравнению с судами с традиционным дифферентом на корму. Снижение общего сопротивления достигает 17 % и позволяет увеличить скорость до 1–1,5 уз, а также получить соответствующую экономию топлива и времени перехода.

Составим таблицу коэффициентов уменьшения влияния составляющих сопротивления для судна «река – море» с носовым бульбом с оптимальным дифферентом на нос в соответствии с материалами настоящей статьи (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты уменьшения составляющих суммарного сопротивления среды движению судна «река – море» с носовым бульбом с оптимальным дифферентом на нос

Коэффициенты снижения составляющих суммарного сопротивления R_{Σ}	Составляющие сопротивления	
	Тихоходные суда (танкеры и балкеры) $Fr = 0,16-0,18$	Быстроходные суда (контейнеровозы, пассажирские) $Fr = 0,25-0,30$
Коэффициент снижения сопротивления трения R_T	1	1
Коэффициент снижения сопротивления формы R_{Φ}	0,5	0,5
Коэффициент снижения волнового сопротивления R_W	0,5	0,5
Коэффициент снижения сопротивления выступающих частей и аэродинамического сопротивления ($R_{ВЧ} + R_A$)	1	1

Произведем итоговый расчет снижения суммарного сопротивления для судна «река – море» с носовым бульбом с оптимальным дифферентом на нос (табл. 6).

Таблица 6

Составляющие суммарного сопротивления среды движению судна с носовым бульбом с оптимальным дифферентом на нос $R_{\Sigma ДН}$ в долях от суммарного сопротивления R_{Σ} у судна с обычным дифферентом

Составляющие суммарного сопротивления $R_{\Sigma ДН}$	Составляющие сопротивления	
	Тихоходные суда (танкеры и балкеры) $Fr = 0,16-0,18$	Быстроходные суда (контейнеровозы, пассажирские) $Fr = 0,25-0,30$
Сопротивление трения $R_{ТДН}$	$0,70R_{\Sigma}$	$0,70R_{\Sigma}$
Сопротивление формы $R_{ФДН}$	$0,12R_{\Sigma}$	$0,04R_{\Sigma}$
Волновое сопротивление $R_{ВДН}$	$0,025R_{\Sigma}$	$0,1R_{\Sigma}$
Сопротивление выступающих частей и аэродинамическое сопротивление $R_{ВЧ} + R_A$	$0,01R_{\Sigma}$	$0,02R_{\Sigma}$
Суммарное сопротивление судна с дифферентом на нос $R_{\Sigma ДН}$	$0,855R_{\Sigma}$	$0,86R_{\Sigma}$
Суммарное сопротивление судна с дифферентом на нос с учетом уменьшения площади смоченной поверхности Ω	$0,812R_{\Sigma}$	$0,817R_{\Sigma}$

Согласно результатам расчетов, представленных в табл. 6, оптимальное дифферентование судна с носовым бульбом на нос эффективно как для тихоходных, так и для быстроходных судов «река – море» с точки зрения снижения составляющих и общего сопротивления, по сравнению с сопротивлением движению судна с обычным дифферентом. Снижение общего сопротивления происходит на величину до 19 %, по сравнению с обычным дифферентом, и позволит увеличить скорость до 1,2–1,8 уз, а также получить значительную экономию топлива и времени перехода.

Суда «река – море» имеют возможность осуществлять плавание как по рекам, которые зачастую характеризуются отсутствием волнения и соответствуют условиям спокойной воды, так и по морским участками, где может развиваться значительное морское волнение. В связи с последним обстоятельством актуальным является вопрос о поддержании оптимального дифферента на нос не только при речном плавании, но и при проходе морских штормовых участков перехода.

Как свидетельствует анализ факторов, влияющих на снижение составляющих сопротивления при оптимальном дифференте на нос, наиболее критичным к параметрам морского волнения является эффект гашения носовой поперечной волны за счет поперечной волны от носового бульба.

Критерием эффективности гашения носовой поперечной волны может являться следующее соотношение между высотой поперечной волны и высотой волны 3-процентной обеспеченности морского волнения на морском переходе судна «река – море»:

$$h_{пв} > h_{3\%}, \tag{8}$$

где $h_{пв}$ – высота носовой поперечной волны, м; $h_{3\%}$ – высота волны 3-процентной обеспеченности, м.

В соответствии с законами формирования носовой поперечной волны ее высота может быть рассчитана:

$$h_{пв} = \frac{4\pi}{gv}. \quad (9)$$

Расчет высоты поперечной волны по формуле (9) в зависимости от скорости судна v представлен в табл. 7.

Таблица 7

Расчет высоты поперечной волны по формуле (9)

Параметры	Значения							
Скорость судна, уз	10	9	8	7	6	5	4	3
Скорость судна, м/с	5,14	4,626	4,112	3,598	3,084	2,57	2,056	1,542
Высота поперечной волны, м	6,58	5,93	5,27	4,61	3,95	3,29	2,63	1,98

Результаты расчета по формуле (9), представленные в табл. 7, а также проверка условия (8) подтверждают, что эффективность гашения носовой поперечной волны с использованием поперечной волны от носового бульба при оптимальном дифференте судна сохраняется практически для любых морских переходов в условиях шторма, где могут осуществлять плавание суда «река – море».

Таким образом, подтверждается эффективность использования оптимального дифферента для судов «река – море» как на речных, так и на морских участках перехода.

Результаты исследования

В настоящем исследовании приведено теоретическое обоснование использования оптимального дифферента судов «река – море» для улучшения ходкости судов различных типов и назначений, осуществляющих плавание по морским и речным участкам. Результаты настоящего исследования позволяют осуществлять поиск оптимального дифферента для различных типов судов, находящихся в эксплуатации, а также создают теоретические основы проектирования новых судов с улучшенными ходовыми характеристиками.

Дифферентование судна «река – море» без носового бульба на нос эффективно как для тихоходных, так и для быстроходных судов с точки зрения снижения составляющих и общего сопротивления, по сравнению с сопротивлением движению судна с обычным дифферентом. Снижение общего сопротивления на величину до 17 %, по сравнению с обычным дифферентом, позволяет увеличить скорость до 1–1,5 уз, а также получить соответствующую экономию топлива и времени перехода.

Определены условия гашения носовой поперечной волны (идущей от форштевня) с использованием носового бульба судна «река – море», для чего предложен интеграл, аналогичный интегралу Мичелла для волнового сопротивления R_W судна с носовым бульбом (1).

Предложен критерий оптимальной осадки судна носом и оптимального дифферента судна (5). Получено решение уравнения (5), которое приводит к значению оптимальной длины волнообразующей части носового бульба или условию оптимального дифферента (6). Частичное гашение носовой поперечной волны будет происходить в диапазоне (7).

Предложены способы реализации выражений (1), (5)–(7) для обеспечения оптимального дифферента существующих и проектируемых судов «река – море» с носовым бульбом.

Оптимальное дифферентование судна с носовым бульбом на нос эффективно как для тихоходных, так и для быстроходных судов «река – море» с точки зрения снижения составляющих и общего сопротивления, по сравнению с сопротивлением движению судна с обычным дифферентом. Снижение общего сопротивления на величину до 19 %, по сравнению с обычным дифферентом, позволяет увеличить скорость до 1,2–1,8 уз, а также получить значительную экономию топлива и времени перехода.

Определен критерий эффективности использования оптимального дифферента для судов «река – море» на морских участках перехода (8). Проиллюстрирована возможность использования оптимального дифферента для судов «река – море» как на речных, так и на морских участках перехода.

Заключение

Теоретическое обоснование оптимального дифферента судов «река – море» позволяет заложить научные основы решения проблем улучшения ходкости существующих и проектируемых судов с использованием оптимального дифферентования судна в различных условиях плавания.

Результаты настоящего исследования способствуют осуществлению поиска оптимального дифферента для различных типов судов, находящихся в эксплуатации, а также могут служить теоретическими основами при проектировании новых судов с улучшенными ходовыми характеристиками.

В настоящей статье приведены теоретические основы оптимального дифферента судов «река – море», подтверждающие, что использование дифферентования судна эффективно как для тихоходных, так и для быстроходных судов с точки зрения снижения составляющих и общего сопротивления, по сравнению с сопротивлением движению судна с обычным дифферентом. Снижение общего сопротивления на величину до 20 %, по сравнению с обычным дифферентом, позволит увеличить скорость до 2-х уз, а также получить соответствующую экономию топлива и времени перехода.

Практические рекомендации по достижению оптимального дифферента конкретных судов будут рассмотрены в последующих работах авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А., Буклис П. И.* Способы увеличения скорости и экономии топлива танкера при штормовом плавании // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2018. № 6 (52). С. 1122–1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.
2. *Ершов А. А., Развозов С. Ю., Буклис П. И.* Увеличение скорости и экономия топлива при штормовом плавании судна. Теоретические основы и практические решения // Сб. тез. докл. Нац. науч.-практ. конф. проф.-преподават. состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова» (Санкт-Петербург, 16 сентября – 25 октября 2019 г.). СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. С. 80–81.
3. *Ершов А. А., Развозов С. Ю., Буклис П. И.* Практические способы расхождения танкера со штормом // Сб. тез. докл. Нац. науч.-практ. конф. проф.-преподават. состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова» (Санкт-Петербург, 16 сентября – 25 октября 2019 г.). СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. С. 81–83.
4. *Ершов А. А., Буклис П. И., Развозов С. Ю.* Способы эффективного маневрирования танкера в условиях шторма // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2020. № 3 (61). С. 515–525. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-515-525.
5. *Ершов А. А., Буклис П. И., Развозов С. Ю.* Использование маневра «12 – 60» для безопасного и эффективного маневрирования танкера в шторм // Приоритетные направления научных исследований. Анализ, управление, перспективы: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Челябинск, 02 февраля 2021 г.). Уфа: Омега Сайнс, 2021. Ч. 1. С. 59.
6. *Ершов А. А., Крицкий А. И., Развозов С. Ю.* Учет опасностей штормового плавания при маневрировании судна // Приоритетные направления научных исследований. Анализ, управление, перспективы: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (Челябинск, 02 февраля 2021 г.). Уфа: Омега Сайнс, 2021. Ч. 1. С. 60.
7. *Справочник по теории корабля: в 3-х т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.*

Статья поступила в редакцию 02.06.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрей Александрович Ершов – д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры маневрирования и управления судном; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; Россия, 198035, Санкт-Петербург; erшов_63@mail.ru.

Вадим Вячеславович Мищенко – соискатель кафедры маневрирования и управления судном; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; Россия, 198035, Санкт-Петербург; kaf_gm@gumrf.ru.



THEORETICAL GROUNDS FOR DETERMINING OPTIMAL TRIM OF RIVER-SEA VESSELS

A. A. Ershov, V. V. Mishenko

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents the theoretical substantiation of using the optimal trim of “river-sea” vessels in order to improve the propulsion of vessels of various types and purposes navigating on seas and rivers. There has been carried out the analysis of the optimal trim for different types of ships in operation. The given calculations prove the possibility of designing new ships with improved sailing characteristics. The scheme of damping the bow shear wave coming from the stem of the “river-sea” vessel is illustrated using the shear wave coming from the bow bulb, with a differential to the bow. It is proved that trimming of a “river-sea” vessel without a bow bulb is effective for slow-moving and high-speed vessels due to the reduction of components and total drag, compared to the resistance to the movement of a vessel with a conventional trim. An integral similar to Mitchell integral for the wave drag of a vessel with a bow bulb is proposed, by means of which the conditions for damping a bow shear wave (coming from the stem) using the bow bulb of a “river-sea” vessel are determined. The elements composing resistance to the vessel propulsion are investigated in detail: total resistance of the medium to the movement of the vessel, resistance of friction, shape, protruding parts, wave, and aerodynamic resistance. There are considered the criteria of the optimal bow draft of the vessel and optimal trim of the vessel, the criteria of the efficient use of the optimal trim for the “river-sea” vessels on the sea sections. An equation is given that determines the value of the optimal length of the wave-forming part of the bow bulb or the condition for the optimal trim. The pictures illustrating a sea vessel bulb, the bow of which is capable of effectively forming a shear wave at a given differential are shown. Conclusions are made about the possibility of using the optimal trim for river-sea vessels on river and sea sections, recommendations are given that contribute to saving fuel and time, increasing the speed to two knots while reducing the total resistance by up to 20%.

Key words: optimal trim of the vessel, theoretical foundations, use of optimal trim to improve seaworthiness, medium resistance against ship propulsion, wave height.

For citation: Ershov A. A., Mishenko V. V. Theoretical grounds for determining optimal trim of river-sea vessels. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3:40-51. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-40-51.

REFERENCES

1. Ershov A. A., Buklis P. I. Sposoby uvelicheniia skorosti i ekonomii topliva tankera pri shtormovom plavanii [Methods of increasing speed and saving fuel of tanker navigating in storm]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2018, no. 6 (52), pp. 1122-1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.
2. Ershov A. A., Razvozov S. Iu., Buklis P. I. Uvelichenie skorosti i ekonomii topliva pri shtormovom plavanii sudna. Teoreticheskie osnovy i prakticheskie resheniia [Increase in speed and fuel economy of vessel navigating in storm. Theoretical foundations and practical solutions]. *Sbornik tezisov dokladov Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova» (Sankt-Peterburg, 16 sentiabria – 25 oktiabria 2019 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. Pp. 80-81.
3. Ershov A. A., Razvozov S. Iu., Buklis P. I. Prakticheskie sposoby raskhozhdeniia tankera so shtormom [Practical ways of tanker avoiding storm]. *Sbornik tezisov dokladov Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova» (Sankt-Peterburg, 16 sentiabria – 25 oktiabria 2019 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. Pp. 81-83.
4. Ershov A. A., Buklis P. I., Razvozov S. Iu. Sposoby effektivnogo manevrirovaniia tankera v usloviakh shtorma [Methods of tanker effective maneuvering in storm]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2020, no. 3 (61), pp. 515-525. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-515-525.
5. Ershov A. A., Buklis P. I., Razvozov S. Iu. Ispol'zovanie manevra «12 – 60» dlia bezopasnogo i effektivnogo manevrirovaniia tankera v shtorm. Prioritetnye napravleniia nauchnykh issledovaniia. Analiz, upravlenie,

perspektivy [Using “12 – 60” maneuver for safe and effective tanker maneuvering in stormy weather. Priority areas of scientific research. Analysis, management, perspectives]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Cheliabinsk, 02 fevralia 2021 g.)*. Ufa, Omega Sains Publ., 2021. Part 1. P. 59.

6. Ershov A. A., Kritskii A. I., Razvozov S. Iu. Uchet opasnostei shtormovogo plavaniia pri manevrirovanii sudna. Prioritetnye napravleniia nauchnykh issledovani. Analiz, upravlenie, perspektivy [Considering hazards of storm navigation for maneuvering vessel. Priority areas of scientific research. Analysis, management, perspectives]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Cheliabinsk, 02 fevralia 2021 g.)*. Ufa, Omega Sains Publ., 2021. Part 1. P. 60.

7. *Spravochnik po teorii korablia: v 3-kh tomakh. Part 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniiu sudov. Sudovye dvizhiteli* [Handbook on theory of ship: in 3 Volumes. Part 1. Hydromechanics. Resistance to ship traffic. Ship propellers]. Pod redaktsiei Ia. I. Voitkunsogo. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 768 p.

The article submitted to the editors 02.06.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Ershov – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Ship Maneuvering and Control; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Russia, 198035, Saint-Petersburg; ershov_63@mail.ru.

Vadim V. Mishenko – Competitor of the Department of Ship Maneuvering and Control; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Russia, 198035, Saint-Petersburg; kaf_gm@gumrf.ru.

