

- 4 Зинкевич И.Г. Аналитическая химия. Химический анализ. – М.: Лань, 2019
- 5 Береза И.Г. Очистка судовых нефтесодержащих вод / И.Г. Береза, А.А. Кучинская // Транспортное дело России. – 2011. – № 9. – С. 103-105

#### References

- 1 Tehnicheskiy spravochnik po problemam vodi, Moscow, ASV, 2007

- 2 Getmantsev S.V. Ochistka promishlennih stochnih vod koagulyantami i flokulyantami Moscow, ASV, 2008
- 3 Veytser Yu.I. Visokomolekulyarnie flokulyanti v protsessah ochistki vodi, Moscow, ASV, 2010
- 4 Zinkevich I.G. Analytical chemistry. Chemical analysis. – М.: Lan, 2019
- 5 Bereza I.G. Purification of ship oil-containing waters / I.G. Bereza, A.A. Kuchinskaya // Transport business of Russia. - 2011. - №. 9. - P. 103-105

УДК 629.5

DOI: 10.34046/aumsuomt105/22

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА МОРСКОГО СУДНА

*Н.А. Халилов, старший преподаватель*

На протяжении всей истории судостроители стремились увеличить скорость судов. Параметры гребного винта оказывают большое влияние на эффективность использования судна и морскому инженеру необходимо знать и понимать принципы взаимодействия элементов пропульсивного комплекса. К параметрам которые определяют эффективность элементов пропульсивного комплекса относятся : скорость хода судна, диаметр и частота вращения гребных винтов, эффективная мощность главных двигателей и др. Данные параметры оказывают большое влияние на главные показатели коммерческой и технической эксплуатации судов морского флота.

**Ключевые слова.** Пропульсивный комплекс, винт, корпус морского судна, эффективность взаимодействия, параметры винта, компоненты сопротивления судну.

## FEATURES OF INTERACTION OF ELEMENTS OF THE PROPULSIVE COMPLEX OF A MARINE VESSEL

*N.A. Khalilov*

Throughout history, shipbuilders have sought to increase the speed of ships. The parameters of the propeller have a great influence on the efficiency of the use of the vessel and the marine engineer needs to know and understand the principles of interaction of the elements of the propulsive complex. The parameters that determine the effectiveness of the elements of the propulsive complex include : the speed of the vessel, the diameter and speed of the propellers, the effective power of the main engines, etc. These parameters have a great influence on the main indicators of commercial and technical operation of ships of the navy.

**Keywords.** Propulsive complex, screw, hull of a marine vessel, interaction efficiency, screw parameters, components of resistance to the vessel.

### Основные параметры винта морского судна

#### 1) Диаметр

С целью достижения наивысшей эффективности и наименьшего расхода топлива, как правило, предпочтительным является максимально возможный диаметр гребного винта  $d$ .

Как правило, гребному винту не разрешается выступать ниже базовой линии корпуса на торговых судах, и обычно предусмотрен небольшой запас, чтобы гарантировать, что гребной винт не будет поврежден в случае посадки на мель или во время сухого докования. Взаимодействие между винтом и морским дном может повредить не только винт, но и валопровод, редуктор (если установлен) и сам главный двигатель.

Кроме того, размер гребного винта ограничен расстоянием между концом гребного винта и нижней частью корпуса, поскольку слишком

близкое расположение гребного винта к корпусу может привести как к высокой вибрации, так и к шуму.

При любых условиях эксплуатации гребной винт должен быть полностью погружен в воду.

Особенно для балкеров и танкеров, часто работающих в балластном состоянии, это уславливает ограничение на диаметр гребного винта.

Контейнеровозы работают с более постоянным водоизмещением, поскольку соотношение между порожними и полными контейнерами сегодня практически постоянно, независимо от маршрута. Это позволяет увеличить размер винта.

#### 2) Отношение диаметра и шага

Отношение диаметра шага  $p/d$  выражает отношение между шагом (углом)  $p$  винта и его диаметром  $d$ .

Шаг  $p$  - это расстояние, на которое винт “прокручивает” себя вперед по воде за один оборот, при условии отсутствия скольжения. Поскольку шаг изменяется по радиусу лопасти, соотношение обычно рассчитывается для шага  $0,7 \times r$ , где  $r = d/2$  - радиус винта. Оптимальный шаг зависит от скорости вращения и диаметра винта.

### 3) Коэффициент площади диска винта

Коэффициент площади диска (иногда называемый коэффициентом расширенной площади лопасти) определяет развитую площадь поверхности винта по отношению к площади его диска. Эта область должна быть достаточно большой, чтобы избежать вредной кавитации, которая может привести к эрозии, но не слишком большой, так как это увеличит сопротивление трения на винте.

Соотношение 0,40 к 0,60 типично для нормально нагруженных 4-лопастных винтов. На высоконагруженных одновинтовых контейнеровозах значения могут достигать 1,0. Чтобы учесть это, необходимо увеличить количество лопастей.

Винты могут быть изготовлены с 2,3, 4, 5, 6 или 7 лопастями. В общем, чем меньше количество лопастей, тем выше будет эффективность винта. Однако по соображениям прочности и вибрации на торговых судах обычно используются 4, 5 и 6-лопастные гребные винты. С 4 лопастями являются наиболее распространенными.

Нижний предел числа лопастей обычно устанавливается различной величиной усилий, испытываемых лопастями при движении через “тень” корпуса, когда они находятся сверху, и в менее ограниченном потоке внизу. Условия течения за корпусом обычно описываются как “поле следа”. Для сглаживания нагрузки требуется достаточное количество лопастей.

Оптимальная скорость винта зависит от количества лопастей. Таким образом, при том же

диаметре винта 6-лопастной винт имеет примерно на 10% меньшую оптимальную скорость вращения винта, чем 5-лопастной.

### 4) Типы и геометрия гребных винтов

#### Винты с фиксированным шагом

Винты фиксированного шага (ВФШ) отлиты в одном блоке и обычно изготавливаются из медного сплава. Положение лопастей раз и навсегда фиксировано с заданным шагом.

Большинство судов, которым не требуется особенно хорошая маневренность, таких как океанские контейнеровозы, танкеры и сухогрузы, оснащены гребным винтом ВФШ, поскольку он обеспечивает высочайшую эффективность. Это связано с небольшим соотношением ступицы к диаметру 0,15-0,20.

#### Винты с регулируемым шагом

Винты с регулируемым шагом (ВРШ) имеют относительно большую ступицу по сравнению с ВФШ, поскольку в ступице должен быть установлен гидравлически активируемый механизм для управления шагом. Следовательно, ВРШ дороже, чем ВФШ.

Из-за относительно большего размера ступицы, отношение ступицы к диаметру 0,22-0,30, КПД винта немного ниже, обычно на 1-2%. Недостаток ВРШ в большинстве случаев можно восполнить, поскольку он более приспособлен к различным условиям эксплуатации – балласт по сравнению с грузом, загрязненный корпус по сравнению с чистым, тяжелая погода и т.д.

5) Винты специальной геометрии - винт Капеля. Винт Kappel имеет специальную конструкцию, в которой кончик лопасти изогнут в сторону всасывания лопасти (т.е. в прямом направлении), что сводит к минимуму размер вихрей на кончике. Такая конструкция способна снизить требуемую мощность двигателя на 3-6%, особенно для достаточно нагруженных винтов.



Рисунок 1 – Винт специальной геометрии – винт Капеля

### Условия потока. Пограничный слой и след

Когда судно движется, трение корпуса создает так называемый пограничный слой вокруг

корпуса. В этой границе слоя, скорость воды на поверхности корпуса равна скорости судна и

уменьшается с удалением от поверхности корпуса. На определенном расстоянии от корпуса и, по определению, равном внешней “поверхности” пограничного слоя, скорость воды не зависит от судна.

Компоненты сопротивления

Сопротивление судна спокойной воде особенно зависит от его скорости, смещения и формы корпуса. Общее сопротивление  $R_T$  состоит из множества сопротивлений источника  $R$ , которые можно разделить на три основные группы, а именно:

- 1) Сопротивление трению,  $R_F$
- 2) Остаточное сопротивление,  $R_R$
- 3) Сопротивление воздуха,  $R_A$

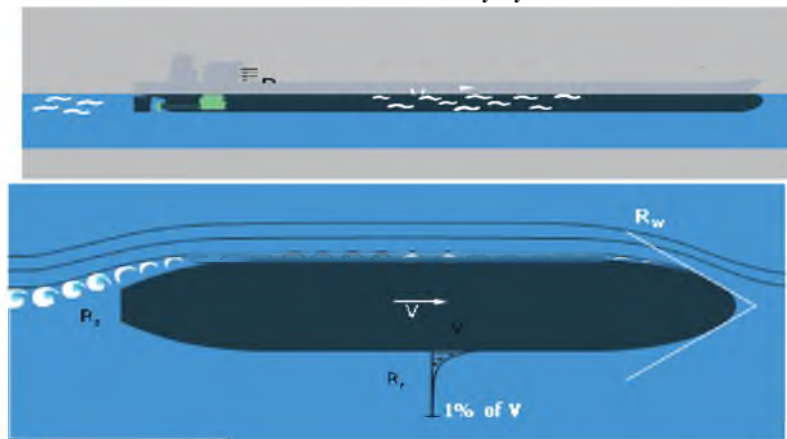


Рисунок 2 – Компоненты сопротивления судну

Сопротивление трению,  $R_F$

Сопротивление трению  $R_F$  учитывает два эффекта:

Во-первых, трение плоской пластины той же длины, что и корпус, и площади, эквивалентной смоченной поверхности корпуса.

Во-вторых, сопротивление трению, вызванное кривизной корпуса судна по сравнению с плоской пластиной. Величина сопротивления трению увеличивается с загрязнением корпуса, т.е. ростом водорослей, морской травы и ракушек.

Сопротивление воздуха,  $R_A$

В безветренную погоду сопротивление воздуха, в принципе, пропорционально квадрату скорости судна и площади поперечного сечения судна над ватерлинией. Важно отличать сопротивление воздуха от сопротивления ветра, сопротивление воздуха учитывает только сопротивление от перемещения судна по воздуху без ветра.

Остаточное сопротивление,  $R_R$

Остаточное сопротивление  $R_R$  включает в себя сопротивление образованию волн и сопротивление вязкому давлению. Иногда дополнительное сопротивление трению, обусловленное

Влияние сопротивления трению зависит от смоченной поверхности корпуса, в то время как величина остаточного сопротивления описывает энергию, теряемую судном при создании волн, вихрей и сопротивления вязкому давлению, которые все зависят от линий корпуса. Для тихоходных судов, таких как танкеры и балкеры, сопротивление трению часто имеет наибольшее влияние (70-90%).

Сопротивление воздуха обычно составляет около 2% от общего сопротивления, однако со значительным увеличением до около 10% для судов с большими надстройками, таких как контейнеровозы со штабелями контейнеров на палубе. Если учитывать сопротивление ветра, то цифры могут увеличиться.

кривизной корпуса судна, также включается в остаточное сопротивление.

**Ускорение, ограниченный диапазон скоростей, скорость маневрирования и вращение винта**

Ускорение является важным параметром для маневренных характеристик судна. Кроме того, существует связь между характеристиками ускорения и характеристиками судна при повышенном сопротивлении: если судно может создавать высокую силу тяги для ускорения при низкой скорости судна, оно также может создавать высокую силу тяги для преодоления высокого сопротивления на низкой скорости в тяжелых погодных условиях.

**Способы взаимодействия винта и корпуса судна.**

Это взаимодействие осуществляется либо посредством соединения между валовой системой и судном, либо посредством импульсов давления, передаваемых через воду от гребного винта к поверхности корпуса. Силы и моменты взаимодействия можно рассматривать как вклю-

чающие как постоянную, так и колеблющуюся составляющую. Взаимодействие винта и судна можно рассматривать в двух отдельных категориях. Первый включает в себя силы и моменты, передаваемые через валовую систему, называемые "несущими силами", а второй состоит из ранее испытанных на судне, которые передаются через воду в форме импульсов давления; они называются "гидродинамическими силами".

Таким образом, эти два класса взаимодействия рассматриваются отдельно следующим образом.

#### 1) Несущие усилия

Нагрузки, испытываемые судном, которые относятся к категории несущих сил, видно, что они образуют ряд механических и гидродинамических сил и моментов, все из которых либо воздействуют на подшипники валовой системы, либо изменяют вибрационные свойства судна, таким образом приводя систему в движение: например, изменяя инерцию или массу системы. В случае реакции подшипников создаваемые винтом силы и моменты поддерживаются смазочной пленкой в подшипниках, которая сама поддерживается механической конструкцией подшипников и их посадочными местами. Как следствие, при анализе судовых систем управления валом важно также признать, что, в дополнение к влиянию гребного винта, жесткость и демпфирование смазочной пленки в подшипниках могут иметь важные последствия с точки зрения отклика вала.

2) Добавленная масса, инерция и демпфирование.

При погружении гребного винта в воду эффективные характеристики массы и инерции гребного винта при вибрации как части системы вращения вала изменяются из-за наличия воды вокруг лопастей. Кроме того, существует также термин демпфирования, который следует учитывать, исходя из вибрации гребного винта в воде. Этот режим вибрации учитывает общие свойства пропеллера как компонента линейного вала, и поэтому вибрационное поведение отличается от индивидуальной вибрации лопастей.

Глобальные колебательные характеристики винта определяются двумя гидродинамическими эффектами. Первая заключается в том, что гребной винт возбуждается вариациями гидродинамической нагрузки из-за его работы в неоднородном следовом поле. Вторая - это реактивная нагрузка, вызванная колебательным поведением гребного винта, что приводит к изменению угла атаки сечения, что, в свою очередь, приводит к изменению гидродинамической реактивной

нагрузки. Теперь для винта при условии, что изменения угла атаки невелики, можно считать, что вибрационная нагрузка изменяется линейно, и применяется принцип суперпозиции, что означает, что возможны независимые оценки нагрузки возбуждения и нагрузки реакции. Как следствие, для определения нагрузки возбуждения, вызванной винтом, работающим в кильватерном поле при отсутствии какого-либо колебательного движения, рассматривается только установившееся вращение винта.

#### 3) Гидродинамическое взаимодействие

Гидродинамическое взаимодействие между гребным винтом и корпусом возникает в результате прохождения лопастей под корпусом или вблизи него, а также в результате кавитационной динамики на поверхностях лопастей. Перепады давления, вызванные этими двумя типами воздействия, затем передаются через воду для создания колеблющегося давления на поверхности корпуса, которое, благодаря своему действию на конечную площадь, создает силу возбуждения на судне. Как следствие, анализ гидродинамического взаимодействия наиболее удобно рассматривать в трех частях; однако каждая деталь в конечном итоге объединяется с другими, при условии соблюдения фазовых углов каждой детали, для формирования общего сигнала давления на поверхности корпуса.

#### 4) Влияние бульба.

Бульб сегодня является обычным явлением в конструкции судов. Основная теоретическая работа по их эффективности была проведена Уигли, в которой он показал, что если бульб имеет форму, близкую к сферической, то ускорение потока над поверхностью создает область низкого давления, которая может простирается к поверхности воды. Затем эта область низкого давления реагирует с носовой волной давления, чтобы отменить или уменьшить влияние носовой волны. Эффект выпуклой носовой части, таким образом, в большинстве случаев должен вызывать снижение эффективной мощности, необходимой для приведения судна в движение.

Влияние бульба на изменение характеристик сопротивления и передаваемой мощности можно объяснить несколькими причинами. Основные из них заключаются в следующем:

1. Уменьшение носовой волны давления из-за поля давления, создаваемого бульбом и как следствие, уменьшение сопротивления волнообразованию.

2. Влияние верхней части бульба и ее пере- сечения с корпусом на введение нисходящей со- ставляющей потока в районе носовой части.

3. Увеличение сопротивления трения, вы- званное площадью поверхности бульба.

4. Изменение КПД двигателя, вызванное влиянием бульба на глобальное поле обтекания корпуса.

5. Изменение сопротивления волновому разрушению.

В дополнение к своему гидродинамиче- скому поведению бульб также усложняет расчеты сопротивления.

5) Сопротивление погружению транца

На современных судах транцевая корма те- перь является обычной практикой. Если при рас- четном режиме мощности часть транца погру- жена в воду, это приводит к отрыву, происходя- щему при выходе формы потока под транцем за пределы корпуса. Результирующая завихрен- ность, возникающая в отрывном потоке за тран- цем, приводит к падению давления за корпусом, что учитывается в некоторых процедурах расчета.



Рисунок 3 – Транцевая корма современного судна

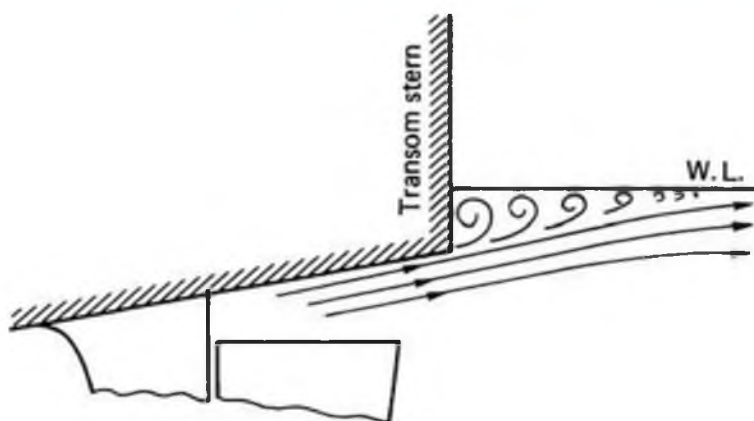


Рисунок 4 - Обтекание погруженной транцевой кормы

Величина этого сопротивления, как пра- вило, невелика и, конечно, исчезает при высыха- нии нижней части транца. Сопротивление погру- жению транца в значительной степени зависит от сопротивления давлению, которое не зависит от масштаба.

Увеличение скорости хода судов, умень- шение мощности судовых двигателей для получе- ния необходимой скорости, значительное сокра- щение затрат на топливо – являются основными целями для надлежащей эксплуатации пропуль- сивного комплекса морского судна.

#### Литература

1. <https://cordis.europa.eu/article/id/90488-new-energyefficient-ship-propulsion>
2. <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-ship-propulsion-system-behaviour-and-on-Shi-Grimmelius/8f1f36f7dfe5a49f308fe04ea71bfe5732834719>
3. [http://www.mercury-ms.ru/txt/articles/10\\_2006/03/](http://www.mercury-ms.ru/txt/articles/10_2006/03/)
4. Халилов Н.А., Страхова Н.А. Опыт эксплуатации судовых двухтопливных дизелей// Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и техно- логия.– 2011.– 2,– С. 124-127.
5. Коперчак О.П. Анализ информационных техно- логий в области морского транспорта, методы повышения работоспособности в системе то и

ремонта // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 3 (92)

**Referens:**

1. <https://cordis.europa.eu/article/id/90488-new-energyefficient-ship-propulsion>
2. <https://www.semanticscholar.org/paper/Analysis-of-ship-propulsion-system-behaviour-and-on-Shi-Grimme-lius/8f1f36f7dfe5a49f308fe04ea71bfe5732834719>
3. [http://www.mercury-ms.ru/txt/articles/10\\_2006/03/](http://www.mercury-ms.ru/txt/articles/10_2006/03/)
4. Experience in the operation of marine dual-fuel diesels. Khalilov.N.A., Strakhova.N.A. Article in the journal: Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology. Number: 2, Year: 2011, Pages: 124-127. UDC: 621.499
5. Koperchak O.P. 2019. Analysis of information technologies in the field of maritime transport, methods of improving performance in the system of then and repair. Marine intellectual technologies/Marine intellectual technologies № 3 (92)

**УДК 621**

DOI: 10.34046/aumsuomt105/23

## **МЕРЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЭУ И СНИЖЕНИЮ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА СУДНА**

*Д.В. Огурцов, кандидат технических наук, доцент  
О.П. Коперчак, кандидат экономических наук, доцент  
Н.А. Халилов, старший преподаватель*

Статья посвящена проблематике энергоэффективности судна. Рассмотрены используемые и потенциальные технические и эксплуатационные меры по энергосбережению, в том числе непосредственно связанные с состоянием корпуса судна и с оптимизацией гидродинамических процессов работы винторулевой группы судна. Данные меры направлены на обеспечение эффективной эксплуатации СЭУ, повышение энергоэффективности судна и снижение выбросов в атмосферу.

**Ключевые слова:** энергоэффективность судна, эффективная эксплуатация СЭУ, расход топлива, винторулевая группа, сопротивление корпуса, обрастание корпуса, шероховатость, устройства гидродинамического улучшения, выбросы в атмосферу, парниковые газы

## **MEASURES TO ENSURE EFFICIENT OPERATION OF SPP AND REDUCTION OF EMISSIONS TO THE ATMOSPHERE BY OPTIMIZING THE HYDRODYNAMIC PROCESSES OF THE ELEMENTS OF THE SHIP'S PROPULSION COMPLEX**

*D.V. Ogurtsov, O.P. Koperchak, N.A. Khalilov*

The article is devoted to the problems of ship's energy efficiency. The used and potential technical and operational measures for energy saving, including those directly related to the state of the ship's hull and the optimization of the hydrodynamic processes of the ship's propeller-steering group, are considered. These measures are aimed at ensuring the efficient operation of the power plant, increasing the energy-efficiency of the ship and reducing emissions into the atmosphere.

**Key words:** vessel energy-efficiency, efficient operation of SPP, fuel consumption, propeller-steering group, hull resistance, hull fouling, roughness, Hydrodynamic Improvement Devices (HIDs), air emissions, greenhouse gases.

**Введение.** Энергетический контроль и энергоэффективность судов, направленные на снижение выбросов вредных веществ в атмосферу, весьма актуальные в настоящее время, будут иметь все большее значение в ближайшие годы. По данным Четвертого исследования ИМО по выбросам парниковых газов 2020 г., выбросы парниковых газов (GHG), включая двуокись углерода (CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>) и закись азота (N<sub>2</sub>O), выраженные в эквиваленте CO<sub>2</sub>, от общего объема морских перевозок (международных, внутренних и рыболовных) увеличились с 977 миллионов тонн в 2012 году до 1076 млн тонн в 2018 году

(рост на 9,6%). В 2012 г. выбросы CO<sub>2</sub> составили 962 млн тонн, а в 2018 г. этот показатель вырос на 9,3% до 1056 млн тонн выбросов CO<sub>2</sub>. Также увеличилась доля выбросов от судоходства в глобальных антропогенных выбросах с 2,76 % в 2012 г. до 2,89 % в 2018 г. [1].

Хотя судоходство, безусловно, является наиболее энергоэффективным видом коммерческого транспорта, различные исследования показали, что выбросы парниковых газов от судоходства, будут увеличиваться со временем, если их оставить без жесткого контроля. По прогнозам, в