

## Дзюба А.Ф. Физическая природа скорости хода реальных судов и известных способов ее повышения

Полученная в [1] и приведенная в [2] аналитическая формула скорости хода простейшего цилиндрического, без носовых и кормовых обводов, тела в водной среде имеет вид

$$v = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{N_p}{M} RT \sqrt{\frac{a}{l_y}}}; \quad (1)$$

откуда мощность на гребном винте определяется формулой

$$N_p = \frac{2Mv^2}{RT \sqrt{\frac{a}{l_y}}}; \quad (2)$$

где  $N_p$  – мощность на гребном винте, кВт;

$M$  – массовое водоизмещение тела, т;

$R$  – гидравлический радиус, м;

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (3)$$

$\omega$  – площадь поперечного сечения тела, при осадке  $H$ , м<sup>2</sup>;

$$\omega = B \cdot H; \quad (4)$$

$B$  – ширина тела, м;

$\chi$  – смоченный периметр, м;

$$\chi = B + 2H; \quad (5)$$

$T$  – продолжительность одного импульса движущей силы, с;

$$T = \frac{l_y}{c}; \quad (6)$$

$l_y$  – длина цилиндрического тела, м;

$c = 5100$  м/с – скорость звука в стали, скорость распространения ударной волны деформации упругого сжатия по стальному телу;

$a = 1435$  м/с – скорость звука в воде;

$\nu = 1.1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент кинематической вязкости воды при ее температуре 16°C.

Из-за ударно-дискретного приложения движущей силы, упора гребного винта, когда гребной винт выполняет роль не только движителя, но и генератора ударных волн упругого сжатия по корпусу, обоснование чему приведено в [1, §2] и [2, §1], за каждый промежуток времени  $T$  импульса движущей силы скорость поступательного движения тела возрастает на приращение  $\Delta v$  и, кроме того, встречная жидкость одновременно воспринимает от передней грани тела удар с такой же скоростью  $\Delta v$ , вызванный энергией упругого сжатия тела, высвобождающейся в момент добегания ударной волной передней грани тела. За промежуток времени  $t$  от начала приложения к телу движущей силы, упора гребного винта, тело приобретает скорость поступательного движения  $v_n = n\Delta v$ , а встречная жидкость испытывает  $n$  ударов от передней грани тела, воспринимая энергию  $n$  ударных волн упругого сжатия, где  $n = \frac{t}{T}$  - количество импульсов движущей силы за время  $t$ .

Исходным уравнением для вывода формулы скорости (1), как показано в [1, §5], послужило уравнение

$$\mu \frac{2v^2}{R} \chi l_y = \frac{1}{2} \rho \Delta v^2 a \omega; \quad (7)$$

где  $\mu = 1.1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{мс}}$  - коэффициент динамической вязкости воды при темпе-

ратуре 16°C;

$\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воды;

$\chi l_y = S$  – смоченная боковая поверхность тела при смоченном периметре  $\chi$  и длине тела  $l_y$ ;

Левая часть уравнения (7) представляет собой мощность сопротивления вязкого трения, как произведение силы вязкого трения  $\mu \frac{2v}{R} \chi l_u$  на скорость  $v$  равномерного движения тела.

Правая часть уравнения (7) представляет собой поток энергии  $\Phi$  - количество энергии, переносимое ударной волной по жидкости от поверхности передней грани в единицу времени, [3, §82. Энергия упругой волны].

$$\Phi = \frac{1}{2} \rho \Delta v^2 a \omega ; \quad (8)$$

$\omega$  - площадь носовой грани тела, равная площади сечения тела,  $m^2$ .

Поток энергии  $\Phi$  (8), - скалярная величина и имеет размерность мощности.

Поток энергии от поверхности носовой грани во встречную жидкость во все время движения тела, от самого начала действия на него движущей силы, имеет постоянное значение.

$$\Phi = \frac{1}{2} \rho \Delta v^2 a \omega = const ; \quad (9)$$

Мощность же сопротивления силы вязкого трения  $P_{mp}$ , левая часть уравнения (7), возрастает с началом движения тела от нуля пропорционально квадрату скорости  $v$  поступательного движения тела.

$$P_{mp} = \mu \frac{2v^2}{R} \chi l_u \neq const ; \quad (10)$$

Участок движения, когда

$$\Phi > P_{mp} ;$$

является участком ускоренного движения тела.

В момент времени, когда

$$P_{mp} = \Phi ;$$

ускоренное движение тела переходит в равномерное движение с постоянной скоростью  $v$  на всем дальнейшем продолжении пути.

С этого момента времени прекращается увеличение скорости хода тела, хотя на него и продолжает действовать упор гребного винта, продолжая генерировать по телу прохождение волн упругого сжатия.

Наступление равномерного движения тела со скоростью  $v$  объясняется тем, что приращение кинетической энергии тела, получаемое им за счет приращения скорости хода  $\Delta v$  одного импульса движущей силы, полностью гасится работой сил трения по смоченной поверхности тела, определяемой скоростью хода тела  $v$ .

Вывод формулы скорости хода реального судна дается для простейшего судна с площадью сечения корпуса  $\omega = BH$ , а носовая часть судна выполнена в виде двойного клина с углом атаки  $\alpha$ , Рис. 1.

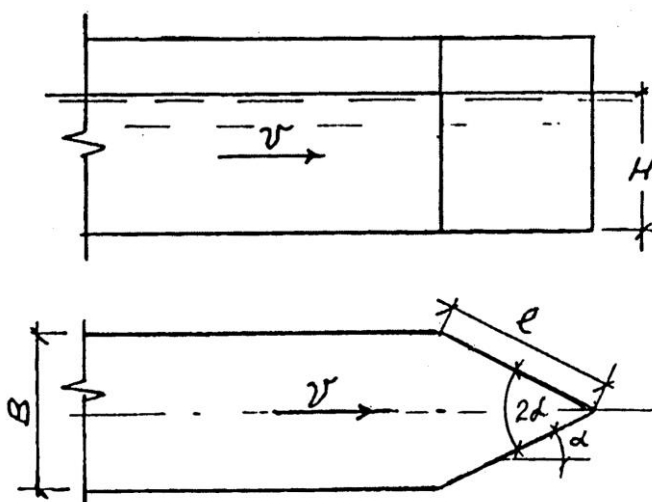


Рис. 1

Синус угла атаки для носовой части в форме двойного клина может быть выражен через отношение площади  $\omega$  сечения корпуса к площади  $\Omega$  смоченной носовой боковой поверхности

$$\sin \alpha = \frac{\omega}{\Omega} ; \quad (11)$$

Действительно:

Площадь сечения корпуса выражается в виде

$$\omega = BH ; \quad (12)$$

Формула площади смоченной боковой носовой поверхности имеет вид

$$\Omega = 2lH ; \quad (13)$$

где  $l$  – длина боковой носовой грани;

Относя (12) к (13), после сокращений, подтверждается определение синуса угла  $\alpha$  по (11), как отношение противолежащего катета  $\frac{B}{2}$  к гипотенузе  $l$ :

$$\sin \alpha = \frac{B}{2l} ; \quad (14)$$

Основой исходному уравнению для вывода формулы скорости хода судна с носовой частью в форме двойного клина служит то же условие (7), когда мощность  $P_{mp}$  сопротивления силы вязкого трения становится равной потоку энергии  $\Phi$  от поверхности носовых обводов судна во встречную жидкость.

Мощность сопротивления сил трения для такого судна имеет вид левой части уравнения (7)

$$P_{mp} = \mu \frac{2v^2}{R} \chi l_y ; \quad (15)$$

где  $l_y$  – длина цилиндрического тела, по водоизмещению эквивалентного данному судну, м;

$$l_y = \frac{V}{\omega} ; \quad (16)$$

$V$  – водоизмещение судна, м<sup>3</sup>;

$\omega$  - площадь сечения корпуса, м<sup>2</sup>.

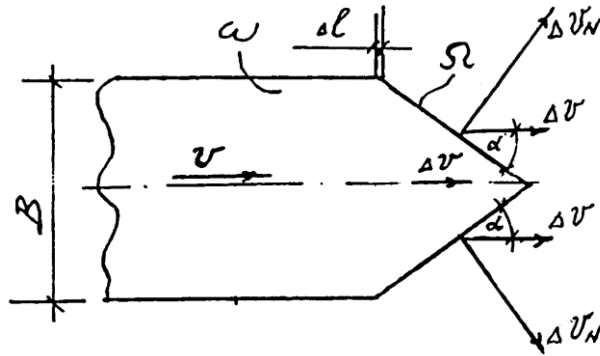


Рис. 2

Ударные волны упругого сжатия корпуса, добегаая до основания носовой части корпуса, высвобождают свою энергию, отклоняя носовую часть от цилиндрической вставки корпуса на расстояние  $\Delta l$  – величину линейной деформации упругого сжатия корпуса, Рис. 2.

Носовая часть корпуса, удаляясь на расстояние  $\Delta l$  со скоростью смещения  $\Delta v$ , своей поверхностью  $\Omega$  осуществляет удар по встречной жидкости.

При этом нормальная составляющая скорости динамического воздействия носовой поверхности по жидкости из Рис.2 имеет выражение

$$\Delta v_n = \frac{\Delta v}{\sin \alpha}; \quad (17)$$

Поток энергии  $\Phi_n$  от носовой боковой поверхности  $\Omega$  запишется в виде

$$\Phi_n = \frac{1}{2} \rho \Delta v_n^2 a \Omega; \quad (18)$$

Подставляя  $\Omega$  из (11),  $\Omega = \frac{\omega}{\sin \alpha}$ , а  $\Delta v_n$  по (17), поток энергии  $\Phi_n$  принимает окончательное выражение

$$\Phi_n = \frac{1}{\sin^3 \alpha} \cdot \frac{1}{2} \rho \Delta v^2 a \omega; \quad (19)$$

Приравнивая (15) и (19), получаем исходное уравнение для вывода формулы скорости хода

$$\mu \frac{2v^2}{R} \chi l_y = \frac{1}{\sin^3 \alpha} \cdot \frac{1}{2} \rho \Delta v^2 \omega a ; \quad (20)$$

С учетом того, что  $\frac{\mu}{\rho} = v$ ;  $\frac{\omega}{\chi} = R$ ; уравнение (20) разрешается относительно  $v^2$

$$v^2 = \frac{1}{\sin^3 \alpha} \cdot \frac{\Delta v^2}{4} R^2 \frac{a}{v l_y} ; \quad (21)$$

откуда выражение скорости хода  $v$  получаем путем извлечения корня из правой части уравнения (21)

$$v = \sin^{-1.5} \alpha \cdot \frac{1}{2} \Delta v R \sqrt{\frac{a}{v l_y}} ; \quad (22)$$

Учитывая, что  $\Delta v = GT$ , где  $G = \frac{F}{M}$ , а  $F$  – движущая сила, упор гребного винта, то уравнение (22) принимает вид

$$v = \sin^{-1.5} \alpha \cdot \frac{1}{2} \frac{F}{M} RT \sqrt{\frac{a}{v l_y}} ; \quad (23)$$

Движущая сила, упор гребного винта, в формуле (23) может быть выражена через мощность на гребном винте, как  $F = \frac{N_p}{v}$ , тогда формула скорости хода (23), после извлечения корня, выраженная через мощность  $N_p$ , подводимую к гребному винту, окончательно примет вид

$$v = \sin^{-0.75} \alpha \sqrt{\frac{1}{2} \frac{N_p}{M} RT \sqrt{\frac{a}{v l_y}}} ; \quad (24)$$

Сравнивая формулы (1) и (24), замечаем, что формула (1) скорости хода цилиндрического тела без носовых обводов, является частным случаем общей формулы скорости хода судна (24) для случая, когда угол атаки носовой по-

верхности становится равным  $90^\circ$  при  $\sin\alpha=1.0$ , а носовая поверхность становится передней торцевой гранью цилиндрического тела.

Выражение под корнем в формуле (24) является скоростью хода эквивалентного цилиндрического тела, а множитель перед корнем  $\sin^{-0.75}\alpha$  является коэффициентом эффективности действия носовых обводов на ходкость тела, после оборудования его обводами без изменения водоизмещения.

Оценка качества формулы скорости хода (24), осуществлялась путем применения ее к реальным судам.

Как показано в [1, §5] для судов водоизмещением от  $1500 \text{ м}^3$  до  $7000 \text{ м}^3$ , с современной традиционной формой носовых обводов, эффективность обводов имеет практически равное для всех судов значение, по величине эквивалентное эффективности носовой части в форме двойного клина с углом атаки носовых граней

$$\alpha_{\text{экв.}} \cong 40^\circ; \quad (25)$$

То есть для всех судов указанного диапазона водоизмещений применима формула (24) с коэффициентом

$$K_э = \frac{1}{\sin^{0.75} 40^\circ} \cong 1.393; \quad (26)$$

Надежность формулы (24) скорости хода для реальных водоизмещающих судов позволяет определять мощность энергетических установок проектируемых судов, не прибегая к исследованию моделей этих судов в опытовых бассейнах.

**Пример:** Определить мощность энергетической установки для судна водоизмещением  $V = 3000 \text{ м}^3$ , ширина судна  $B = 13,5 \text{ м}$ ; осадка  $H = 3,0 \text{ м}$ ; скорость хода –  $5,56 \text{ м/с}$  ( $20,0 \text{ км/ч}$ ), коэффициент использования номинальной мощности двигателей  $\eta_l = 0.90$ ; коэффициент вязкости воды принять



$\nu = 1.1 \cdot 10^{-6} \frac{M^2}{c}$  ; эффективность носовых обводов принять эквивалентной носовой части в форме двойного клина с углом атаки  $\alpha = 40^\circ$ .

**Решение:** Площадь сечения корпуса

$$\omega = BH = 40.5 \text{ м}^2;$$

Смоченный периметр

$$\chi = B + 2H = 19.5 \text{ м}^2;$$

Гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi} = 2.08 \text{ м};$$

Эквивалентная длина судна

$$l_{у.} = \frac{V}{\omega} = 74.07 \text{ м};$$

Продолжительность импульса упора гребного винта

$$T = \frac{l_{у.}}{c} = 0.0145 \text{ с}$$

Из формулы (24) мощность на валу гребного винта

$$N_p = \frac{\sin^{1.5} \alpha 2M\nu^2}{RT \sqrt{\frac{a}{\nu_y}}} = \frac{0.515 \cdot 2 \cdot 3000 \cdot 5.56^2}{2.08 \cdot 0.0145 \cdot \sqrt{\frac{1435 \cdot 10^6}{1.1 \cdot 74.07}}} = 754.7 \text{ кВт}$$

Мощность главных двигателей

$$N_l = \frac{N_p}{\eta_l} = 838.5 \text{ кВт (1139 л.с.)}$$

Округляя, мощность энергетической установки судна принимаем равной 1200 л.с.

## **Способы повышения скорости хода водоизмещающих судов.**

### **а) За счет увеличения площади носовых боковых обводов судна.**

Коэффициент эффективности носовых обводов в формуле (24) скорости хода судна и его выражение по (26) указывают, что для увеличения скорости хода судна при той же мощности его энергетической установки достаточно уменьшить угол атаки носовых обводов  $\alpha$ , а по (11), для этого достаточно увеличить площадь носовых обводов судна.

Оказывается, что роль увеличения площади носовых боковых обводов судна без увеличения его длины выполняет характерный выступ в носовой оконечности судна, называемый носовым бульбом, эффективность которого исследовалась опытным путем известными авторами, Давид Тэйлор в США, Такао Инуи в Японии, [4, стр.127]. Применение носового бульба позволяет, как показало его практическое применение, увеличивать скорость хода судов на 10-15%.

Настоящим раскрывается природа эффективного действия носового бульба на скорость хода судна – с устройством бульба увеличивается площадь носовых обводов корпуса, что ведет к уменьшению угла атаки встречной жидкости носовой частью судна, следствием чего является снижение сопротивления движению судна.

**б) За счет уменьшения упругости (продольной жесткости) корпуса согласно изобретению по Патенту № 2397101, [2, §4].**

Скорость звука в стали  $c = 5100$  м/с и скорость звука в воде  $a = 1435$  м/с являются скоростью распространения энергии ударных упругих волн, соответственно, по корпусу судна и по воде.

По существу скорость звука в стали  $c$  и скорость звука в воде  $a$  характеризуют энергопроводность стали и воды. Энергия от энергетической установки судна с помощью гребного винта отдельными порциями, из-за ударно-

дискретного его воздействия, передается через корпус судна встречной жидкости. Поток этой энергии по стальному корпусу судна, воздействующий на основание носовой части, в  $\frac{c}{a}$  раз мощнее, чем поток энергии, уносимый по воде от поверхности носовой части в результате ее ударов по встречной жидкости. То есть, встречная жидкость не успевает отводить от корпуса всю энергию, поступающую от энергетической установки, а излишек энергии переходит в потенциальную энергию волны подпора перед носовой поверхностью, высота которой или скоростной напор, определяют величину лобового сопротивления.

Для предотвращения образования перед носовой поверхностью волны подпора, то есть для полного устранения лобового сопротивления, добиваются уменьшения потока энергии, передаваемого от корпуса встречной жидкости, чтобы не оставалось излишков энергии на образование подпорной волны. Для этого между носовой частью корпуса судна и его цилиндрической частью помещают упругую вставку, которая аккумулирует в себе энергию ударных упругих волн по стальному корпусу, периодически передавая ее встречной жидкости путем периодического отклонения носовой части от цилиндрической вставки корпуса. При этом интенсивность ударов носовой части по встречной жидкости становится значительно ниже, чем интенсивность ее ударов при добегании ударных волн со скоростью звука в стали без упругой вставки. Снижением интенсивности ударов носовой части по встречной жидкости обеспечивается полный отвод потока энергии встречной жидкостью без образования перед носовой частью судна волны подпора.

### **Выводы:**

1. Скорость хода судна принципиально определена процессом ударно-дискретного взаимодействия упора гребного винта с корпусом судна и процессом взаимодействия носовой части корпуса со встречной жидкостью.

стью в виде чередующихся периодических ее ударов по ней, сопровождающихся затратами энергии на турбулизацию.

2. Известный способ увеличения скорости хода судна за счет устройства носового бульба объясняется местным увеличением площади носовых обводов, сопровождающимся уменьшением угла атаки носовых обводов судна.
3. Способ увеличения скорости хода за счет установки в корпусе судна упругой вставки пониженной жесткости ведет к существенному снижению частоты ударов носовой части судна по встречной жидкости, то есть к существенному снижению затрат энергии на турбулизацию и образование волны подпора.

### **Литература**

1. Дзюба А. Ф. Повышение энергетической эффективности современного судоходства или новый тип водоизмещающих судов, 69 стр. Деп. рук. № 1150-В2006, ВИНТИ, М., 2006 г. ( см. сайт [www.newhydraulics.ru](http://www.newhydraulics.ru))
2. Дзюба А. Ф. Технология 2-кратного увеличения скорости хода тихоходных судов (сухогрузов, танкеров, супертанкеров). Интернет, сайт [www.newhydraulics.ru](http://www.newhydraulics.ru)
3. Савельев И.В. Курс общей физики. т.1, М., 1970г.
4. Томас К., Гилмер. Проектирование современного корабля. «Судостроение», Л., 1984г.

г.Новочеркасск

7 мая 2012 г.