

УДК. 629. 123. 4

А. Ф. Дзюба

**Технология 2-кратного увеличения
скорости хода тихоходных судов
(сухогрузов, танкеров, супертанкеров)**

г. Ростов-на-Дону
2010 год

Оглавление

	стр.
Введение	3
1. Динамическое, ударно-дискретное, действие упора гребного винта на корпус судна.....	3
2. Статическое, непрерывно равномерное, действие движущей силы на корпус судна.....	10
3. Физическая природа пропульсивного коэффициента полезного действия.....	17
4. Способ и устройство, повышающее скорость хода судов.....	22
4.1. Уменьшение жесткости корпуса судна.....	24
5. Особенность нового способа движения в жидкой среде.....	30
Литература.....	34

Введение

В современном судостроении утвердилось и разделяется многими судостроительными центрами представление о невозможности дальнейшего существенного увеличения скорости хода судов без увеличения мощности их энергетических установок.

Работой [1] подвергается сомнению такое представление и предлагается принципиально новый способ повышения эффективности движения судна, увеличения скорости хода без увеличения мощности, путем уменьшения жесткости корпуса судна.

Настоящая работа является продолжением и дополнением работы [1] и вызвана необходимостью объяснения причин возникновения ударно-дискретного характера действия движущей силы, упора гребного винта, на корпус судна; анализа движения судна под действием статического приложения движущей силы при его буксировке; необходимостью замены конструкции устройства, уменьшающего жесткость корпуса, описанного в [1], как не технологичного и громоздкого в исполнении, с приведением методики расчета устройства.

1. Динамическое, ударно-дискретное, действие упора гребного винта на корпус судна

Полученная в [1] аналитическая формула скорости хода простейшего цилиндрического тела в жидкой среде имеет вид

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

где N_p – мощность на валу гребного винта, кВт;

M – массовое водоизмещение тела, т;

R – гидравлический радиус, м;

$$R = \frac{\omega}{x}; \quad (2)$$

ω – площадь погруженной части поперечного сечения тела при осадке H , м²;

x – смоченный периметр этой площади, м;

$$\chi = B + 2H; \quad (3)$$

B – ширина тела, м;

T – продолжительность одного импульса движущей силы, с;

$$T = \frac{l_y}{c}; \quad (4)$$

l_y – длина цилиндрического тела, м;

c – скорость звука в стали, скорость распространения упругой деформации сжатия по стальному корпусу тела;

$$c = 5100 \text{ м/с}$$

$a = 1435 \text{ м/с}$ – скорость звука в воде;

$\nu = 1.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воды при $t = 16^\circ\text{C}$.

Приведенная формула скорости получена из условия принятия гипотезы ударно-дискретного действия на тело упора гребного винта, движущей силы.

Несмотря на хорошее подтверждение этой формулы в приложении ее к действующим грузовым судам, приведенном в [1], тем не менее, гипотеза дискретно-ударного приложения движущей силы к корпусу судна, при сложившемся представлении о непрерывно-равномерном во времени приложении движущей силы, упора гребного винта, к корпусу судна, требует пояснений.

Объяснение причин возникновения ударного характера действия гребного винта на корпус судна заключается в следующем.

Как известно [2], скорость поступательного движения гребного винта v_p при передаче им нагрузки на корпус судна при равномерном движении судна имеет вид

$$v_p = nh; \quad (5)$$

где n – число оборотов гребного винта за 1 сек;

h – абсолютная поступь гребного винта, путь проходимый винтом в осевом направлении за 1 оборот.

Из теории режима работы гребного винта [2] известно, что

в моменты времени, когда поступательная скорость хода судна v'_c равна скорости поступательного движения гребного винта v'_p , независимо от абсолютного значения их величины,

$$v'_c = v'_p; \quad (6)$$

в эти моменты времени величина упора гребного винта, величина движущей силы, обращается в нуль. В этом случае гребной винт не может упереться в корпус судна, т.к. скорость его поступательного движения равна скорости убегающего от него корпуса судна. К примеру, судно с работающим винтом буксируется другим судном со скоростью v'_p .

Рассмотрим в жидкой среде, Рис. 1, простейшее однородное упругое тело сечением ω и длиной l , приводимое силой F из состояния покоя в состояние движения. Под движущей силой будем понимать упор гребного винта.

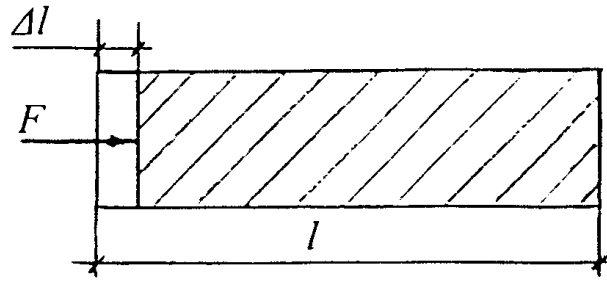


Рис. 1

В начальный момент времени приложения движущей силы тело, обладая инертностью, свойством сохранять состояние покоя, сопротивляется движению и сжимается движущей силой.

При постоянном числе оборотов гребного винта в начальный момент взаимодействия винт набегает на неподвижный край тела со скоростью (5), $v_p = nh$, - это максимально возможная развиваемая гребным винтом скорость его поступательного движения.

Действительная же скорость поступательного движения гребного винта с начала взаимодействия вынужденно определяется лишь скоростью смещения u частиц тела от положения их равновесия при нарастании деформации Δl упругого сжатия тела движущей силой.

К концу времени T взаимодействия по (4)

$$T = \frac{l}{c};$$

сжатием оказывается охвачено все тело, и все его частицы к этому моменту времени смещаются от положения равновесия со скоростью смещения

$$u = \frac{\Delta l}{T}; \quad (7)$$

где Δl – величина линейной деформации упругого сжатия тела.

К концу времени T , в момент достижения фронтом сжатия переднего края тела, оно теряет состояние покоя и приходит в состояние поступательного движения, а скорость u смещения частиц тела от положения равновесия становится скоростью Δv поступательного движения тела

$$\Delta v = u; \quad (8)$$

Свое поступательное движение со скоростью Δv тело начинает, находясь в сжатом состоянии, при этом напряжения сжатия тела у его переднего края, в фронте сжатия, имеют максимальные значения, а у края приложения движущей силы, упора гребного винта, - эти напряжения равны нулю [3, ↓ 81]. Всю область l сжатия тела силой F надо рассматривать как элемент продольной волны упругого сжатия, распространяющейся по телу, с амплитудой смещения частиц тела от положения равновесия, равной деформации Δl упругого сжатия тела.

За все время T взаимодействия на каждую частицу тела со стороны гребного винта действовало ускорение

$$G = \frac{F}{M}; \quad (9)$$

где F – движущая сила, упор гребного винта;

M – масса тела;

Под действием этого ускорения к концу времени T тело приобрело скорость поступательного движения Δv по (8), значение которой следует выразению

$$\Delta v = GT; \quad (10)$$

За это же время T взаимодействия на сам гребной винт со стороны тела, согласно 3-му закону Ньютона, действовала равная и противоположно направленная сила, которая замедляла, тормозила. максимально возможную

скорость его поступательного движения $v_p = nh$ по (5) до скорости u смещения частиц тела от положения равновесия, или, согласно (8) до скорости Δv поступательного движения тела.

Ускорение, испытываемое каждой частицей массы гребного винта за время T в направлении противоположном вектору скорости v_p , равно

$$G_p = \frac{v_p - \Delta v}{T}; \quad (11)$$

К концу времени T скорость поступательного движения гребного винта становится равной

$$v'_p = v_p - G_p T; \quad (12)$$

С учетом G_p по (11) скорость поступательного движения гребного винта (12) после сокращений уменьшается до значения

$$v'_p = \Delta v; \quad (13)$$

Таким образом, за время T взаимодействия тело ускоряется упором гребного винта до скорости Δv поступательного движения из состояния покоя, а гребной винт тормозится телом до скорости Δv поступательного его движения из состояния движения с максимально возможной развиваемой скоростью.

Следуя (13), к концу времени T взаимодействия скорость поступательного движения гребного винта v'_p падает до скорости Δv поступательного движения тела, поэтому согласно положению теории режима работы гребного винта, приведенного выше, в этот момент времени упор гребного винта на тело равен нулю.

Подобно тому, как молоток в результате удара по наковальне отбрасывается от нее силой реакции наковальни, так и гребной винт отбрасывается от корпуса судна силой его реакции. При неизменном числе оборотов гребного винта и его ускоренном противодвижении от корпуса, реактивная сила отбрасываемой греб-

ным винтом воды воспринимается непосредственно самим гребным винтом, уменьшая его давление на корпус судна.

К концу времени T удара, когда скорость поступательного движения гребного винта падает до скорости Δv по (13), его давление на корпус судна обращается в нуль, а реактивная сила отбрасываемой гребным винтом воды полностью воспринимается только одной инертной массой самого гребного винта.

Так как число оборотов гребного винта остается постоянно неизменным, то в момент перехода значения упора гребного винта через нуль мгновенно происходит ударное начало следующего периода T взаимодействия гребного винта с телом из-за опережающего набегания гребного винта на тело с его максимально возможной развиваемой скоростью поступательного движения под действием реактивной силы отбрасываемой гребным винтом воды. Именно максимально возможная развиваемая гребным винтом скорость его поступательного движения, с которой он каждый раз входит во взаимодействие с телом, определяет ударно-дискретный характер приложения движущей силы, упора гребного винта, при приведении тела в движение.

Из сказанного можно заключить, что гребной винт, как движитель судна, является, кроме того, генератором продольных волн упругого сжатия, распространяющихся по корпусу судна от кормы к носовой поверхности с частотой

$$v_0 = \frac{1}{T}; \quad (14)$$

К примеру, для сухогруза «Волго-Дон» при его длине 135 м, частота ударов носовой поверхности корпуса по встречной жидкости от волн упругого сжатия при добегании ими носовой поверхности судна составляет

$$v_0 = \frac{5100}{135} \cong 38 \text{ Гц}; \quad (15)$$

Подтверждение этих ударов по встречной жидкости можно найти в литературе [4, стр. 136]. «Турбулентность пограничного слоя вызывается периодическими колебаниями давления – волнами возмущения с частотой около 100Гц». По всей вероятности, приведенные измерения колебаний давления у носовой поверхности судна выполнялись на судне длиной около 50 метров.

2. Статическое, непрерывно равномерное, действие движущей силы на корпус судна

Рассмотрим в жидкой среде, Рис. 2, простейшее однородное упругое тело сечением ω и длиной l , приводимое силой F из состояния покоя в состояние движения. Под движущей силой будем понимать силу буксировки тела, например, с помощью специальной тележки, движущейся по рельсам, уложенным по обеим сторонам опытового бассейна, или с помощью буксировочного устройства гравитационного типа, когда тело буксируется падающим грузом, при помощи троса, натянутого на систему блоков.

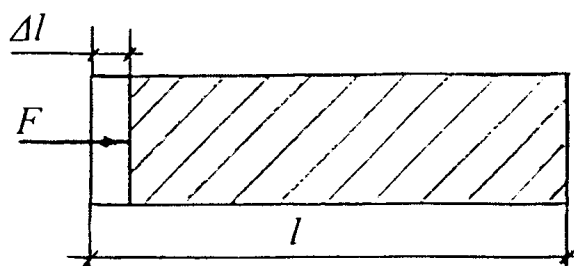


Рис. 2

В начальный момент времени приложения движущей силы тело, обладая инертностью, свойством сохранять состояние покоя, сопротивляется движению и сжимается движущей силой.

К концу времени по (4) $T = \frac{l}{C}$, сжатие охватит все тело, и все его частицы, молекулы к этому моменту времени приобретут скорость движения

$$u = \frac{\Delta l}{T}; \quad (16)$$

Следует подчеркнуть, что скорость u частиц тела при этом является не скоростью их поступательного смещения от положения равновесия, какой она является при ударном приложении движущей силы, а является скоростью возвратно-поступательных колебаний частиц, молекул, тела относительно положения равновесия, вызванного уменьшением расстояний между ними в результате сжатия тела. Кинетической энергией возвратно-поступательных колебаний со скоростью u частицы тела сопротивляются сжатию, стремясь занять по отношению друг к другу расстояния, соответствующие расстояниям их нормальной плотности, плотности несжатого тела.

К концу времени T , в момент достижения фронтом сжатия переднего края тела, оно приобретает скорость поступательного движения по (10)

$$\Delta v = GT;$$

Кинетическая энергия поступательного движения тела в этот момент времени равна

$$\Delta E = \frac{1}{2} M \Delta v^2; \quad (17)$$

Свое поступательное движение тело начинает, находясь в равномерно сжатом состоянии. а запас потенциальной энергии упругого сжатия тела, накопленной в нем к концу времени T сжатия его движущей силой, следуя [3, ↓ 45], равен

$$\Delta \Pi = \frac{1}{2} E \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 V; \quad (18)$$

где V – объем тела;

E – модуль упругости тела:

$$E = \rho C^2 ; \quad (19)$$

ρ - плотность тела;

C – скорость звука в материале тела, из (4) имеет вид

$$C = \frac{l}{T} ; \quad (20)$$

Δl – деформация упругого сжатия тела, из (7) имеет вид

$$\Delta l = uT ; \quad (21)$$

Подставляя в (18) выражения (19), (20) и (21), потенциальная энергия упругого сжатия, накопленная в теле от сжатия его движущей силой F , после сокращений и с учетом $\rho V = M$ – масса тела, примет вид:

$$\Delta \Pi = \frac{1}{2} Mu^2 ; \quad (22)$$

Сравнивая (22) и (17), замечаем, что при

$$u = \Delta v ; \quad (23)$$

кинетическая энергия поступательного движения тела, приобретенная им за время T импульса движущей силы, численно равна потенциальной энергии упругого сжатия тела за время T , накопленной в нем из-за действия реакции тела, стремящейся сохранить его состояние покоя против действия движущей силы.

Равенством этих сил, движущей силы и реакции тела, согласно 3-му закону Ньютона, объясняется и равенство энергий, сообщаемых ими телу - кинетической энергии поступательного движения и потенциальной энергии упругого его сжатия. Последнее служит также обоснованием правомочности принятия равенства (23).

После начала поступательного движения тела со скоростью Δv , оно продолжает свое ускоренное движение, находясь постоянно в сжатом состоянии, и к концу времени t действия движущей силы скорость его поступательного движения определяется выражением

$$v = Gt; \quad (24)$$

В течение всего времени t ускоренного движения тела, находящегося постоянно в сжатом состоянии, встречная жидкость воспринимала от набегающей на нее передней грани тела кинетическую энергию возвратно-поступательных колебаний частиц передней грани тела со скоростью их колебаний, следуя (23), равной Δv . При этом молекулы встречной жидкости у самой носовой поверхности тела, соприкасаясь с нею, приобретали от нее эту скорость Δv , являющуюся для молекул жидкости скоростью их теплового, хаотического, движения.

Выражение давления между молекулами жидкости у самой носовой поверхности тела, как показано в [5], совпадает с уравнением Клаузуиса для давления идеального газа

$$P = \frac{2}{3} \rho \frac{\Delta v^2}{2}; \quad (25)$$

где ρ - плотность жидкости.

При этом полная внутренняя энергия теплового движения молекулы воды при ее колебании со скоростью Δv , согласно [5], равна учетверенной кинетической энергии ее поступательного движения

$$\Sigma E_{\text{мол}} = 4 \cdot \frac{1}{2} m \Delta v^2 = 2m \Delta v^2; \quad (26)$$

где m – масса молекулы.

Внутренняя энергия молекул жидкости, заключенная в единице объема, следуя (26) имеет вид

$$\Sigma E_{\text{ед}} = 2\rho\Delta v^2; \quad (27)$$

На всем пути ускоренного движения за время t , молекулы жидкости, обладая скоростью теплового движения Δv , из-за превышения своей внутренней энергии над энергией молекул встречной покоящейся жидкости, перескакивают из пристенной, приносковой, области в основную массу встречной жидкости, передавая ей, свою внутреннюю энергию и скорость v поступательного движения тела. Таким образом, происходит нагнетание высокоэнергетичной жидкости из приграничной области во встречную покоящуюся жидкость с образованием у носовой поверхности тела волны подпора, увлекаемой носовой поверхностью в общем ускоренном движении с телом.

Такое ускоренное движение тела с волной подпора перед ним продолжается до тех пор, пока работа сил трения по смоченной поверхности тела в единицу времени, т.е. мощность, не станет равной работе нагнетания телом жидкости в волну подпора за единицу времени.

Работа сил трения по смоченной поверхности тела в единицу времени равна

$$N_{\text{тр}} = \mu \frac{2v}{R} S v; \quad (28)$$

где $\mu = 1.1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{мс}}$ - коэффициент динамической вязкости воды при $t = 16^\circ\text{C}$;

$\mu \frac{2v}{R} S$ - сила трения на смоченной поверхности тела;

v - скорость движения тела;

R - гидравлический радиус

$$R = \frac{\omega}{\chi}; \quad (29)$$

ω - площадь поперечного сечения тела;

χ - смоченный периметр этой площади;

S – смоченная боковая поверхность тела

$$S = \chi l ; \quad (30)$$

l – длина тела.

Работа нагнетания телом жидкости в волну подпора в единицу времени имеет выражение

$$N_{нагн.} = 2\rho\Delta v^2 \omega a ; \quad (31)$$

где $2\rho\Delta v^2$ - полная внутренняя энергия теплового движения молекул, заключенная в единице объема, по (27);

ω - площадь носовой поверхности, от которой идет нагнетание волны подпора;

$a = 1435$ м/с – скорость звука в воде, скорость распространения в ней упругих деформаций.

При равенстве (28) и (31), тело переходит в равномерный режим движения со скоростью v , при этом его сжатое состояние продолжает сохраняться движущей силой F и реакцией тела на эту силу.

Приравняем (28) и (31)

$$\mu \frac{2v^2}{R} \chi l = 2\rho\Delta v^2 \omega a ; \quad (32)$$

После сокращений, преобразований на основании (29) и (30), а также с учетом

$$v = \frac{\mu}{\rho} ; \quad (33)$$

где ν - коэффициент кинематической вязкости воды, равный $1.1 \cdot 10^{-6}$ м²/с для $t = 16^\circ\text{C}$;

ρ - плотность воды, 1000 кг/м³;

уравнение (32) преобразуется к виду

$$v^2 = \Delta v^2 R^2 \frac{a}{vl}; \quad (34)$$

Откуда скорость равномерного движения тела принимает вид

$$v = \Delta v R \sqrt{\frac{a}{vl}}; \quad (35)$$

Подставляя Δv по (10) и в нее G по (9), окончательно скорость равномерного движения тела примет вид

$$v = \frac{F}{M} RT \sqrt{\frac{a}{vl}}; \quad (36)$$

Движущая сила F через буксировочную мощность N_T записывается в виде

$$F = \frac{N_T}{v}; \quad (37)$$

После простых преобразований, с учетом (37), скорость равномерного движения тела через буксировочную мощность записывается в виде

$$v = \sqrt{\frac{N_T}{M} RT \sqrt{\frac{a}{vl}}}; \quad (38)$$

где M – массовое водоизмещение тела, плавающего в жидкости, тн;

N_T – буксировочная мощность, кВт;

Из (38) необходимая буксировочная мощность, для заданного тела водоизмещением M и требуемой скорости хода v при условии равномерного движения тела, определяется выражением

$$N_T = \frac{Mv^2}{RT \sqrt{\frac{a}{vl}}}; \quad (39)$$

3. Физическая природа пропульсивного коэффициента полезного действия

Чтобы привести судно в движение, к нему должна быть приложена движущая сила, которая при равномерном, поступательном движении судна равна силе сопротивления движению при данной скорости.

$$T = R; \quad (40)$$

где T – движущая сила, кН;

R – сопротивление корпуса судна, кН;

Работа движущей силы за 1 сек. называется буксировочной мощностью N_T

$$N_T = Rv = Tv, \text{ кВт}; \quad (41)$$

где v – скорость хода судна при его равномерном движении, м/с;

Для создания движущей силы используют источник механической энергии – главный двигатель, валопровод с редуктором, передающие эту энергию к движителю и сам движитель – гребной винт.

Отношение буксировочной мощности судна N_T к мощности N_P , подводимой к движителю, гребному винту, называется движительным, или пропульсивным коэффициентом полезного действия судна

$$\eta = \frac{N_T}{N_P}; \quad (42)$$

Общее выражение пропульсивного к.п.д. имеет вид

$$\eta = \eta_P \eta_\theta \eta_K; \quad (43)$$

где η_P – к.п.д. редуктора;

η_θ – к.п.д. валопровода;

η_K – к.п.д. влияния корпуса судна на работу гребного винта;

Численное значение пропульсивного коэффициента для судов, оборудованных гребными винтами, как приведено в [2], ограничено в пределах

$$\eta = 0.5 \div 0.7; \quad (44)$$

Как сказано в [6] – «К.п.д. гребного винта колеблется в пределах 50%-70%. К.п.д., равный 70%, считается очень высоким. Обычно такой к.п.д. бывает у малооборотных гребных винтов большого диаметра. Для высокооборотных винтов малого диаметра к.п.д. редко бывает выше 60% (как правило, около 50%)».

При пропульсивном коэффициенте $\eta = 0.5$, следуя (42) мощность N_P , подводимая к гребному винту равна

$$N_P = \frac{N_T}{0.5} = 2N_T; \quad (45)$$

Подставляя в (45) N_T по (41), фактическая величина движущей силы, развиваемая гребным винтом, упор гребного винта, равняется

$$F = \frac{N_P}{v} = 2R; \quad (46)$$

То есть, при использовании в качестве движителя гребного винта, к нему должна подводиться такая мощность, чтобы развиваемая им движущая сила, упор гребного винта, по величине в 2 раза превышал сопротивление движению корпуса судна.

В таблице 1 приведены формулы скорости движения тела в воде и мощности, затрачиваемой на это движение для 2-х различных способов приложения движущей силы – ударного и статического.

Таблица 1

Наименование показателя	Характер действия движущей силы	
	Ударно-дискретный	Статически-непрерывный
Скорость хода, м/с	$v = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{N_P}{M} RT \sqrt{\frac{a}{vl}}}$	$v = \sqrt{\frac{N_T}{M} RT \sqrt{\frac{a}{vl}}}$
Мощность, приложенная к движителю, кВт	$N_P = \frac{2Mv^2}{RT \sqrt{\frac{a}{vl}}}$	$N_T = \frac{Mv^2}{RT \sqrt{\frac{a}{vl}}}$

Как видно из таблицы, для двух совершенно равных тел по водоизмещению и геометрическим размерам, при равной их скорости равномерного движения, мощность, подводимая к движителю, гребному винту, из-за ударного характера действия упора гребного винта на корпус тела, по величине в 2 раза больше, чем если бы это же тело приводилось в движение способом буксировки при статически непрерывном действии движущей силы.

Сложившийся в мировом судостроении способ определения мощности энергетической установки проектируемого судна основан на опытном, эмпирическом, определении силы сопротивления R движению судна при расчетной скорости v хода судна.

Для этого уменьшенную модель судна, путем буксировки ее в опытовом бассейне, прогоняют при различных скоростях равномерного ее движения, измеряя динамометром силу сопротивления движению модели.

Сопротивление модели для соответственной скорости движения, по отработанной методике, пересчитывают на натурное судно пропорционально его водоизмещению, определяя силу сопротивления движению натурального судна при его буксировке с расчетной скоростью, а так же необходимую буксировочную мощность.

Если бы в реальных условиях проектируемое судно приводилось в движение способом буксировки, к примеру конной, или иной тягой, то величина потребляемой мощности на движение судна по величине мало отличалась бы от буксировочной мощности, определяемой формулой (41), как произведение силы буксировки, пересчитанной с модели судна, на скорость судна.

В действительности, как показала практика использования гребного винта в качестве движителя, мощность, подводимая к гребному винту, должна быть, как правило, увеличена в 2 раза от буксировочной мощности. Только при этом условии гребной винт может создать движущую силу, обеспечивающую величину расчетной скорости хода судна.

Разделив буксировочную мощность на пропульсивный к.п.д. $\eta = 0.5$, тем самым увеличиваем ее в 2 раза, определяя необходимую мощность N_p , подводимую к гребному винту.

Увеличенное в 2 раза значение мощности гребного винта N_p над буксировочной мощностью N_T объясняется только ударно-дискретным характером действия упора гребного винта на корпус судна.

Половина мощности гребного винта затрачивается полезно на движение судна со скоростью v его равномерного движения в условиях сопротивляющейся водной среды, а вторая равная половина мощности гребного винта затрачивается бесполезно на генерирование волн упругого сжатия по корпусу судна с частотой $\nu_0 = \frac{c}{l}$, где c – скорость звука в материале корпуса судна; l – длина судна.

Двойной расход энергии, потребляемой гребным винтом – это плата за простоту конструкции движителя и его неоспоримые преимущества по сравнению с другими движителями – высокая надежность в широком диапазоне

скоростей и оборотов гребного винта; малые размеры и вес; не сложен в изготовлении, дешев и т.п.

Попытки повышения к.п.д. гребного винта, пропульсивного коэффициента до значения большего, чем $\eta = 0.5$, в условиях неизменной жесткости корпуса судна, непродуктивны.

Приводимое же в литературе значение пропульсивного коэффициента более 0.5 и даже весьма высокое, $\eta = 0.7$, которое бывает у малооборотных гребных винтов большого диаметра на больших водоизмещающих судах, объясняется лишь погрешностью в опытном определении буксировочной мощности N_T судна.

С увеличением водоизмещения судна вероятность завышения опытного значения буксировочной мощности судна возрастает. Установленная при этом на судне мощность энергетической установки по завышенной буксировочной мощности, при ходовых испытаниях построенного судна, будет фактически работать с пропульсивным коэффициентом $\eta = 0.5$, развивая несколько большую от расчетной скорость хода судна, показывая якобы большее значение пропульсивного коэффициента, согласно формулы.

$$\eta^+ = \frac{N_T^+}{N_P}; \quad (47)$$

где η^+ - завышенное значение пропульсивного коэффициента;

N_T^+ – завышенное значение буксировочной мощности судна;

$$N_T^+ = KN_T; \quad (48)$$

K – коэффициент больше единицы, показывающий степень завышения от истинного значения буксировочной мощности судна N_T при расчетной скорости движения;

N_P – фактическая мощность на валу гребного винта;

Подставляя в (47) N_T^+ по (48) и N_P по (45), после сокращений, значение пропульсивного коэффициента, при завышении опытного значения буксировочной мощности судна, имеет вид.

$$\eta^+ = \frac{K}{2}; \quad (49)$$

Так при $K = 1.1$ – завышение на 10% опытного значения буксировочной мощности, приводит к увеличенному до $\eta^+ = 0.55$ значению пропульсивного коэффициента.

При $K = 1.4$ – 40% завышения буксировочной мощности по данным модельных опытов, ведет к увеличенному значению пропульсивного коэффициента $\eta^+ = 0.7$.

4. Способ и устройство, повышающее скорость хода судов

Основой убеждению в возможности существенного увеличения скорости хода судна без увеличения мощности его энергетической установки служит аналитическая формула (1) скорости хода в водной среде простейшего цилиндрического тела, вывод которой приведен впервые в [1].

Истинность этой формулы, а следовательно, и истинность процессов, принятых при ее выводе проверялась в сравнении с действующими грузовыми судами при известной мощности их энергетических установок и развиваемой ими при этом крейсерской скорости хода, [1].

Из формулы скорости (1) следует, что при заданных неизменных физических параметрах, входящих в формулу, лишь время T может подвергаться изменению, чтобы увеличить скорость хода заданного тела. Увеличение времени T продолжительности действия одного импульса движущей силы приводит к прямому увеличению значения скорости хода по (1). Как показано в [1]

наиболее эффективное время продолжительности импульса движущей силы для данного цилиндрического тела длиной l_u определяется формулой:

$$T_{эф} = \frac{2l_u}{a}; \quad (50)$$

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

К примеру, для сухогруза «Волго-Дон» с водоизмещением $w = 6755$ м³, шириной $B = 16.5$ м, осадкой $H = 3.5$ м и длиной $l = 135$ м, длина эквивалентного ему цилиндрического тела составляет

$$l_u = \frac{6755}{16.5 \cdot 3.5} = 117 \text{ м}; \quad (51)$$

Эффективное время продолжительности импульса движущей силы по (50) равно

$$T_{эф} = \frac{2 \cdot 117}{1435} = 0.163 \text{ с}; \quad (52)$$

Фактическое же время продолжительности импульса движущей силы в формуле (1) для этого тела составляет:

$$T = \frac{l_u}{c} = \frac{117}{5100} = 0.023 \text{ с}; \quad (53)$$

При установленной мощности двигателей сухогруза «Волго-Дон» $N = 2000$ л.с. = 1472 кВт, мощность на валу гребного винта, с учетом потери мощности в валопроводе и редукторе, примем равной

$$N_p = 0.9 \cdot 1472 = 1324.8 \text{ кВт}; \quad (54)$$

Гидравлический радиус цилиндрической части сухогруза равен:

$$R = \frac{16.5 \cdot 3.5}{16.5 + 2 \cdot 3.5} = 2.46 \text{ м}; \quad (55)$$

Скорость хода цилиндрического тела, эквивалентного сухогрузу «Волго-Дон» определилась по (1) равной

$$v_u = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1324.8}{6755} \cdot 2.46 \cdot 0.023 \cdot \sqrt{\frac{1435 \cdot 10^6}{1.1 \cdot 117}}} = 4.3 \text{ м/с}; \quad (56)$$

Скорость хода этого же тела, но с увеличенной продолжительностью импульса движущей силы по (52) равна:

$$v_3 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{1324.8}{6755} \cdot 2.46 \cdot 0.163 \cdot \sqrt{\frac{1435 \cdot 10^6}{1.1 \cdot 117}}} = 11.46 \text{ м/с}; \quad (57)$$

Крейсерская скорость хода сухогруза «Волго-Дон» составляет:

$$v_k = 21.0 \text{ км/ч (5.83 м/с)}; \quad (58)$$

Относя (58) к (56) получаем значение эффективности действия носовых обводов корпуса у сухогруза «Волго-Дон» на его ходкость,

$$\mathcal{E} = \frac{v_k}{v_u} = 1.36; \quad (59)$$

величина которой приводилась в [1].

Сравнивая скорость хода (57) цилиндрического тела эквивалентного сухогрузу «Волго-Дон», но с увеличенной продолжительностью импульса движущей силы, с крейсерской скоростью хода (58) сухогруза, замечаем, что тело, даже лишенное носовых обводов, но с увеличенной продолжительностью импульса движущей силы, будет иметь в 2 раза большую скорость хода, чем крейсерская скорость хода реального судна «Волго-Дон»

$$\mathcal{E}_{\phi} = \frac{11.46}{5.83} \cong 2.00 \text{ раза}; \quad (60)$$

4.1. Уменьшение жесткости корпуса судна

Движущая сила, ее величина, передаваемая от гребного винта на корпус судна, определяется как отношение мощности на валу гребного винта к скорости хода судна.

$$F = \frac{N_p}{v} ; \quad (61)$$

Для сухогруза «Волго-Дон» при его крейсерской скорости $v_k = 5.83$ м/с и мощности на валу гребного винта $N_p = 1324.8$ кВт величина движущей силы равна

$$F = \frac{1324.8}{5.83} = 227.84 \text{ кН}; \quad (62)$$

Для эквивалентного ему цилиндрического тела при той же мощности на валу гребного винта и скорости $v_u = 4.3$ м/с по (56) величина движущей силы составляет:

$$F_u = \frac{1324.8}{4.3} = 308.1 \text{ кН}; \quad (63)$$

При динамическом, ударном приложении движущей силы к корпусу судна величина линейной деформации упругого сжатия корпуса движущей силой за время T ее одного импульса, равна:

$$\Delta l = uT; \quad (64)$$

где u – скорость смещения частиц корпуса от положения равновесия под действием движущей силы;

$$u = GT; \quad (65)$$

G – ускорение, испытываемое массой судна M от действия движущей силы F

$$G = \frac{F}{M} ; \quad (66)$$

С учетом (65), выражение линейной деформации корпуса судна (64) принимает вид:

$$\Delta l = GT^2; \quad (67)$$

По третьему закону Ньютона со стороны корпуса судна против движущей силы действует равная ей и противоположно направленная сила, которая

может быть выражена через жесткость корпуса и величину линейной деформации упругого сжатия корпуса.

$$F = k\Delta l; \quad (68)$$

откуда жесткость корпуса выражается в виде:

$$k = \frac{F}{\Delta l}; \quad (69)$$

Подставляя в (69) силу из (66), а Δl по (67), после сокращений, жесткость корпуса судна определяется выражением

$$k = \frac{M}{T^2}; \quad (70)$$

где M – массовое водоизмещение судна, кг;

T – продолжительность действия импульса движущей силы, с;

При длине сухогруза «Волго-Дон» $l = 135$ м и его массовом водоизмещении $M = 6755 \cdot 10^3$ кг, с учетом продолжительности импульса движущей силы, равного:

$$T = \frac{135}{5100} = 0.0265 \text{ с}; \quad (71)$$

жесткость корпуса реального сухогруза составляет:

$$k = \frac{6755 \cdot 10^3}{0.0265^2} = 9.6 \cdot 10^9 \text{ Н/м}; \quad (72)$$

Жесткость корпуса эквивалентного сухогрузу «Волго-Дон» цилиндрического тела при $T = 0.023$ с по (53) равна:

$$k_u = \frac{6755 \cdot 10^3}{0.023^2} = 1.27 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}; \quad (73)$$

Жесткость же корпуса этого цилиндрического тела, но с увеличенной продолжительностью импульса движущей силы $T_{эф} = 0.163$ с по (52), определилась равной

$$k_{\text{эф}} = \frac{6755 \cdot 10^3}{0.163^2} = 2.54 \cdot 10^8 \text{ Н/м}; \quad (74)$$

Из (70) следует, что для увеличения продолжительности импульса движущей силы до $T_{\text{эф}}$ по (50) при данном массовом водоизмещении судна M необходимо уменьшить жесткость корпуса судна. В частности, для сухогруза «Волго-Дон» это уменьшение жесткости (74) в сравнении с жесткостью (73) цилиндрического тела составляет 50 раз, а в сравнении с реальной жесткостью (72) корпуса сухогруза – 38 раз.

Следуя [7], уменьшение жесткости корпуса судна, Рис. 3, достигается тем, что носовую часть корпуса 1 отделяют от его цилиндрической части 3 и удерживают у сечения раздела на направляющих консолях 2, воспринимающих поперечные усилия, действующие на корпус судна в плоскости между его носовой частью и цилиндрической.

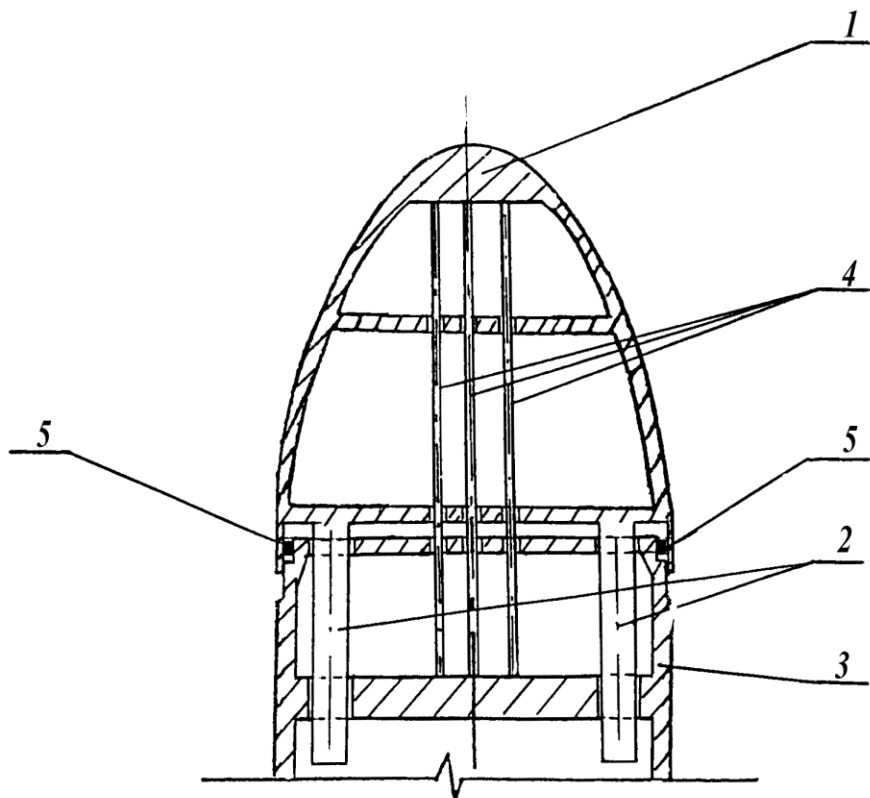


Рис. 3

Носовую часть корпуса соединяют с его цилиндрической частью стержнями 4 из металла, воспринимающими продольную силу, действующую на корпус судна, величина которой определена движущей силой. Примыкание носовой части корпуса к цилиндрической выполняют продольно подвижным с устройством сальника 5, не препятствующего перемещению цилиндрической части корпуса относительно его носовой части при деформации упругого сжатия стержней движущей силой из-за опережающего набегания на них цилиндрической части корпуса.

Численное значение суммарной эффективной жесткости стержней 4, следуя (70), определяется формулой:

$$k_{эф} = \frac{M}{T_{эф}^2} ; \quad (75)$$

где $T_{эф}$ – эффективное время продолжительности импульса движущей силы по (50);

Закон Гука для упруго сжатого стержня может быть представлен в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{ES} ; \quad (76)$$

где Δl – величина упругой деформации сжатия стержня, м;

l – длина стержня, м;

F – сжимающая сила, Н;

S – площадь поперечного сечения стержня, м²;

E – модуль упругости материала стержня, для стали $E = 2.04 \cdot 10^{11}$ Н/м²;

Из (76) выражение сжимающей силы имеет вид:

$$F = \frac{ES}{l} \Delta l = k \Delta l ; \quad (77)$$

То есть, при заданной длине стержня его жесткость определяется формулой:

$$k = \frac{ES}{l} ; \quad (78)$$

При необходимой эффективной жесткости стержней и принятой их длине, суммарная площадь поперечного сечения стержней, следуя (78), определяется выражением:

$$S = \frac{l k_{эф}}{E} ; \quad (79)$$

Для сухогруза «Волго-Дон» при эффективной жесткости корпуса по (74) и принятой длине стержней $l = 10.0$ м, суммарная площадь поперечного сечения стержней определилась равной:

$$S = \frac{10 \cdot 2.54 \cdot 10^8}{2.04 \cdot 10^{11}} = 0.01245 \text{ м}^2 ; \quad (80)$$

При числе стержней в упругой связи $n = 10$, диаметр одного стержня определился равным:

$$d_{ст} = \sqrt{\frac{4S}{n\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.01245}{10 \cdot 3.14}} = 39.8 \text{ мм} \approx 40 \text{ мм}; \quad (81)$$

Таким образом, чтобы у сухогруза «Волго-Дон» жесткость его корпуса уменьшилась до эффективной жесткости, обеспечивающей наибольшую ходкость судна, его носовую часть необходимо подвижно соединить с цилиндрической частью 10-ю стальными стержнями диаметром 40 мм и длиной каждого стержня 10 м.

5. Особенность нового способа движения в жидкой среде

При традиционном равномерном движении судна, согласно уравнению неразрывности потока, расход набегающего на судно потока жидкости равен расходу вытеснения жидкости набегающим на нее судном.

$$Q = \omega \cdot v ; \quad (82)$$

где ω - площадь погруженной части судна с осадкой H ;

При равномерном движении судна вся мощность его энергетической установки по существу расходуется на проталкивание указанного расхода жидкости вдоль смоченной поверхности за счет волны подпора, вызванной положительным градиентом гидродинамического давления у носовой поверхности судна.

При этом импульс движущей силы от движителя, гребного винта, передается корпусу судна, а от него – встречной жидкости.

Как показано в [1] дискретность приложения движущей силы вызывает прохождение по корпусу волн упругого сжатия, ударных волн, с частотой

$$v_0 = \frac{1}{T} ; \quad (83)$$

Встречная жидкость, в момент добегания ударной волной носовой поверхности судна, испытывает от нее толчок, удар, сопровождающий передачу каждого приращения количества движения от корпуса судна встречной жидкости. Материал корпуса судна, сталь, имеет модуль упругости примерно в 100 раз превышающий модуль упругости воды. Поэтому передача импульса движущей силы от корпуса встречной жидкости осуществляется не полностью, а по схеме неупругого взаимодействия, при которой часть приращения количества движения расходуется не на передачу скорости встречной жидкости, а на ее смятие, выжимание ее набегающим корпусом в противоположном направлении вдоль корпуса судна. Времени T продолжительности импульса движущей силы, которое является и временем передачи импульса встречной жидкости, этого времени не достаточно, чтобы встречная жидкость восприняла полностью приращение количества движения от корпуса судна в общем направлении движения.

Таким образом, при традиционном способе движения в водной среде, импульс движущей силы приложенной к корпусу судна, или вся мощность энергетической установки судна, по существу направлены на смятие и выжимание встречной жидкости в направлении, противоположном движению судна, в обход его корпуса.

При движении судна с уменьшенной жесткостью корпуса, продолжительность каждого импульса движущей силы $T_{эф}$ задается такой, чтобы приращение количества движения, получаемое корпусом от каждого импульса движущей силы, полностью, без остатка, передавалось встречной жидкости.

При таком движении взаимодействие корпуса судна со встречной жидкостью осуществляется по схеме упругого взаимодействия, при котором импульс движущей силы от корпуса судна полностью, без остатка, переходит в количество движения волны встречной жидкости в общем направлении с движением судна.

При новом способе движения мощность энергетической установки судна направлена не на проталкивание встречной жидкости вдоль смоченной поверхности в противоположном направлении, а на разгон встречной жидкости до скорости движения судна в виде волны ее механического возмущения, вызванной набегающей на нее носовой поверхностью судна. При этом, судно постоянно догоняет волну возмущения, периодически подталкивая ее и, тем самым, поддерживая ее скорость движения. В промежутках между периодическими подталкиваниями волны, между носовой поверхностью судна и встречной жидкостью действует отрицательный градиент гидродинамического давления, т.к. скорость волны с момента ее подталкивания становится несколько больше скорости набегающей на нее носовой поверхности судна.

Энергетические затраты на проталкивание встречной жидкости в противоположном направлении движению судна вдоль его смоченной поверхности, из-за турбулентного режима обтекания, значительно выше, чем энергетические затраты на образование и поддержание движения механической волны возмущения жидкости перед носовой поверхностью судна. Этим объясняется причина большей энергетической эффективности нового способа движения в жидкости, позволяющего в 2 раза увеличить скорость хода большегрузных тихоходных судов без увеличения мощности их энергетических установок.

По величине энергетических затрат предлагаемый способ движения в водной среде приближается к энергетическим затратам на движение у обитателей водной среды, дельфинов.

Выше показано, что скорость хода цилиндрического тела эквивалентного сухогрузу «Волго-Дон», даже без носовых обводов, но с уменьшенной жесткостью корпуса, увеличилась по (60) в 2 раза. Если же носовую часть этого цилиндрического тела выполнить по схеме на Рис. 3, то с учетом действия эффективности носовых обводов на ходкость судна, увеличение скорости хода, следуя (1), при неизменной мощности составит:

$$\mathcal{E} = \frac{v_{\text{эф}}}{v_{\kappa}} = \sqrt{\frac{T_{\text{эф}}}{T}}; \quad (84)$$

Подставляя в (84) $T_{\text{эф}}$ по (50) и T по (4), после сокращений, абсолютное увеличение скорости хода судна составит:

$$\mathcal{E} = \sqrt{\frac{2c}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5100}{1435}} = 2.67 \text{ раза}; \quad (85)$$

Потребляемая же мощность на движение у судна с уменьшенной жесткостью корпуса, следуя формуле N_p в таблице 1, при неизменной, той же крейсерской скорости хода, уменьшится и составит от потребляемой мощности реального судна при той же скорости хода, лишь

$$\mathcal{E}_N = \frac{T}{T_{\text{эф}}} \cdot 100 = \frac{a}{2c} \cdot 100 = 14\%; \quad (86)$$

Еще в 30-е годы прошлого века известный английский ученый Джеймс Грей, наблюдая за движением дельфинов и определив количество их мышечной энергии, установил, что дельфины располагают лишь 10-ю процентами той энергии, которая требуется расчетом по законам прикладной гидродинамики на движение с наблюдаемой, и поражающей воображение, скоростью, - известный «парадокс Грея» [8]. Дж. Грей предполагал, что объяснение высокой скорости плавания дельфинов связано с *наличием отрицательного градиента динамического давления* в жидкости вдоль тела животного [9]. Возникновение отрицательного градиента динамического давления между встречной

жидкостью и носовой поверхностью у судов с уменьшенной жесткостью корпуса, о чем говорилось выше, подтверждает истинность объяснения Дж. Грея высокой скорости плавания дельфинов.

Искусственно созданным телам, судам с уменьшенной жесткостью корпуса, достаточно располагать по (86) лишь 14-ю процентами энергии реальных судов, чтобы двигаться с такой же скоростью хода. По эффективности движения в воде такие суда приближаются к обитателям водной среды, дельфинам – 10%.

Из-за потерь энергии в самом устройстве, уменьшающей жесткость корпуса, учета его к.п.д. и других погрешностей при исполнении, фактическое увеличение скорости хода судов прогнозируется в 2 раза, а энергетическая эффективность движения – 25%. То есть, при оборудовании судов устройствами новой технологии движения, современная скорость хода судов может обеспечиваться и 25-ю процентами мощности их энергетических установок. Отсюда следует, что при традиционном движении 75% потребляемой мощности современными судами расходуется на турбулизацию, на бесполезное перемешивание окружающей воды.

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.
2. Тихомиров Н.А. Ходкость судна. «Речной транспорт». М., 1959 г.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. т. I. М., 1970 г.
4. Томас К. Гилмер. Проектирование современного корабля. «Судостроение», Л. 1984 г.

5. Дзюба А.Ф. Новая (физическая) теория турбулентного потока жидкости. 153 с. Деп. рук. №1148-В2006, ВИНТИ, М., 2006г.
6. Лучанский И.А., Яновский А.А. От весла до водомета. «Судостроение», Л., 1964г.
7. Дзюба А.Ф. Устройство для увеличения скорости хода судна. Изобретение, заявка №2009121794 от 08.06.2009, Роспатент, М.
8. Нахтигаль В. «ВЕЛЬТВОХЕ», Цюрих, «Когда инженеры учатся у природы». «За рубежом» № 52. 1979г., М.
9. Янов В. Как плавают дельфин. «Наука и жизнь» №9, М., 1991 г.