

Н. Б. Проскурина, Н. С. Сенюшкин, А. В. Суханов, Р. Р. Ямалиев

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПОРА ГРЕБНОГО ВИНТА

Рассматриваются вопросы формирования инженерной методики для расчета энергетических характеристик двигателя. Приведен расчет основных параметров гребного винта и двигателя по основным характеристикам судна. *Судовые газотурбинные двигатели; судовые движители; гребной винт; упор гребного винта*

В настоящее время в связи с возросшей потребностью в проектировании судов различных классов возникает необходимость формирования инженерной методики для расчета энергетических характеристик двигателя. Особое место занимает этап предварительного проектирования. Он характеризуется ограниченностью исходных данных для расчета разрабатываемых узлов. На данном этапе необходимо определить тип и основные характеристики движителя, в том числе потребную мощность главной силовой установки в первом приближении для обеспечения необходимой скорости судна.

Диаметр и шаг винта являются важнейшими параметрами, от которых зависит степень использования мощности двигателя, а следовательно, и возможность достижения наибольшей скорости хода судна. При движении корпус судна увлекает за собой воду, создавая попутный поток, поэтому действительная скорость встречи винта с водой V_A всегда несколько меньше, чем фактическая скорость судна V . У быстроходных глиссирующих мотолодок разница невелика – всего 2–5%, так как их корпус скользит по воде и почти не «тянет» ее за собой. У катеров, идущих со средней скоростью хода, эта разница составляет 5–8%, а у тихоходных глубоководных катеров достигает 15–20%.

В свою очередь и корпус судна, образуя попутный поток, уменьшает скорость потока воды, натекающей на гребной винт. Это учитывает коэффициент попутного потока w .

Скорость натекания воды на винт рассчитывается по формуле

$$V_A = V \cdot (1 - w), \quad (1)$$

V – скорость судна;

Величина, называемая скольжением, обуславливает работу лопасти винта под углом атаки α к потоку воды. Отношение скольжения

к теоретической скорости винта в процентах называется относительным скольжением (2)

$$s = 1 - \frac{H \cdot n}{V_A}, \quad (2)$$

где n – частота вращения винта.

Оптимальная величина скольжения для винтов, имеющих шаговое отношение $H/D < 1,2$, составляет $s = 0,14–0,16$; для винтов, имеющих $H/D > 1,2$, $s = 0,12–0,14$. При выборе шагового отношения H/D можно руководствоваться следующими рекомендациями. Для легких быстроходных лодок требуются винты с большим шагом или шаговым отношением H/D , для тяжелых и тихоходных – с меньшим. При обычно применяемых двигателях с номинальной частотой вращения 1500–5000 об./мин. оптимальное шаговое отношение H/D составляет: для гоночных мотолодок и глиссеров – 0,9–1,5; легких прогулочных катеров – 0,8–1,2; водоизмещающих катеров – 0,6÷3–1,0 и очень тяжелых тихоходных катеров – 0,55÷0,80. Следует иметь в виду, что эти значения справедливы, если гребной вал делает примерно 1000 об./мин. из расчета на каждые 15 км/ч скорости лодки; при иной частоте вращения вала необходимо применять редуктор.

Гребной винт (рис. 1) преобразует вращение вала двигателя в упор – силу, толкающую судно вперед. При вращении винта на поверхностях его лопастей, обращенных вперед – в сторону движения судна (засасывающих), создается разрежение, а на обращенных назад (нагнетающих) – повышенное давление воды. В результате разности давлений на лопастях возникает сила Y (ее называют подъемной). Разложив силу на составляющие – одну, направленную в сторону движения судна, а вторую перпендикулярно к нему, получим силу P , создающую упор гребного винта, и силу T , образующую крутящий момент, который преодолевается двигателем.

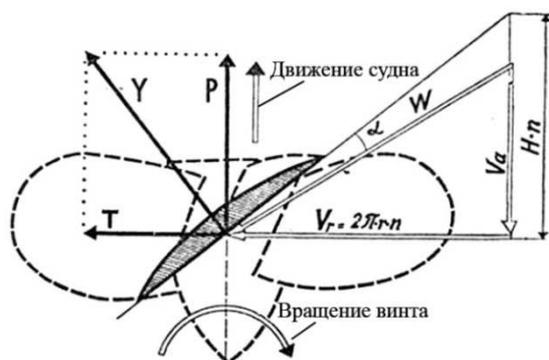


Рис. 1. Схема сил и скоростей на лопасти винта (правого вращения)

На рис. 1 показаны силы и скорости, действующие в каком-то одном определенном поперечном сечении лопасти, расположенном на каком-то определенном радиусе r гребного винта. Окружная скорость вращения V_r зависит от радиуса, на котором сечение расположено ($V_r = 2\pi r n$, где n – частота вращения винта, об/с). Скорость поступательного движения винта V_a остается постоянной для любого сечения лопасти. Таким образом, чем больше r , т. е. чем ближе расположен рассматриваемый участок к концу лопасти, тем больше окружная скорость V_r , а следовательно, и суммарная скорость W .

Так как сторона V_a в треугольнике рассматриваемых скоростей остается постоянной, то по мере удаления сечения лопасти от центра необходимо разворачивать лопасти под большим углом к оси винта, чтобы α сохранял оптимальную величину, т. е. оставался одинаковым для всех сечений. Таким образом, получается винтовая поверхность с постоянным шагом H . Напомним, что шагом винта называется перемещение любой точки лопасти вдоль оси за один полный оборот винта.

Представить сложную винтовую поверхность лопасти помогает рис. 2. Лопасть при работе винта как бы скользит по направляющим угольникам, имеющим на каждом радиусе разную длину основания, но одинаковую высоту – шаг H , и поднимается за один оборот на величину H . Произведение же шага на частоту вращения представляет собой теоретическую скорость перемещения винта вдоль оси.

Упор в большой степени зависит от угла атаки α профиля лопасти. Оптимальное значение α для быстроходных катерных винтов 4–8°. Если α больше оптимальной величины, то мощность двигателя непроизводительно затрачивается на преодоление большого крутящего момента; если же угол атаки мал, подъемная сила и, следовательно, упор P будут невелики, мощность двигателя окажется недоиспользованной.

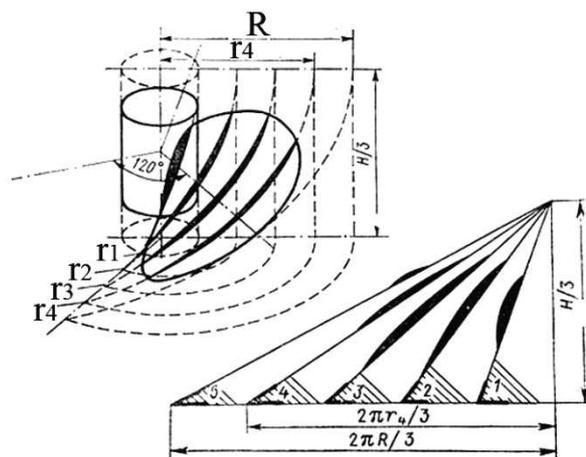


Рис. 2. Винтовая поверхность лопасти (а) и шаговые угольники (б)

На схеме, иллюстрирующей характер взаимодействия лопасти и воды, α можно представить как угол между направлением вектора скорости набегающего на лопасть потока W и нагнетающей поверхностью. Вектор скорости потока W образован геометрическим сложением векторов скорости поступательного перемещения V_a винта вместе с судном и скорости вращения V_r , т. е. скорости перемещения лопасти в плоскости, перпендикулярной оси винта.

Сопrotивление корпуса судна [1] рассчитывается по формуле (3):

$$R = \frac{\zeta \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \Omega}{2}, \quad (3)$$

где $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды, ζ – коэффициент полного сопротивления, Ω – суммарная смоченная поверхность, м^2 .

Сопrotивление корпуса судна зависит от его формы. Для описания формы корпуса судна существует ряд коэффициентов, значение которых влияет на ходовые параметры судна (рис. 3).

Коэффициент полноты конструктивной ватерлинии α – отношение площади конструктивной ватерлинии (КВЛ) к площади прямоугольника, стороны которого равны L и B . Чем меньше этот коэффициент, тем острее ватерлиния. Обычно суда с большим L/B (длинные узкие суда) имеют большие коэффициенты полноты КВЛ, чем короткие широкие суда.

Коэффициент полноты мидель-шпангоута β – отношение погруженной площади мидель-шпангоута к площади прямоугольника со сторонами B и T . На него существенное влияние оказывает форма шпангоутов, а также подъем и радиус скулы. Чем больше подъем и радиус скулы (например, у малых рыболовных судов,

буксиров и ледоколов), тем меньше коэффициент полноты мидель-шпангоута.

Коэффициент общей полноты δ – отношение объема подводной части судна к объему тела со сторонами L , B , T . Этот коэффициент до некоторой степени характеризует форму судна в отношении остроты и оказывает существенное влияние на водоизмещение (грузоподъемность); с другой стороны, с ростом δ увеличивается сопротивление судна. Напротив, судно при заданном водоизмещении с уменьшением коэффициента полноты становится длиннее, не становясь при этом тяжелее, так как потребная мощность двигателя при заданной скорости уменьшается, вследствие чего потребность в топливе становится меньше. Такое судно будет более рентабельным еще и потому, что оно длиннее и, следовательно, может иметь больше трюмов.

Коэффициент продольной полноты ϕ – отношение водоизмещения к объему тела, основанием которого служит площадь мидель-шпангоута, а высотой – длина судна. Этот коэффициент всегда немного больше, чем коэффициент общей полноты, и лучше характеризует остроту оконечностей судна. Большой коэффициент полноты мидель-шпангоута означает полные оконечности судна, небольшой – напротив, узкие. Однако при сравнении двух судов всегда нужно учитывать отношение L/B .

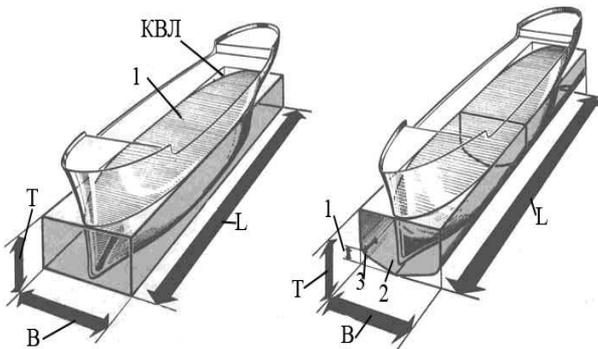


Рис. 3. Коэффициенты полноты ватерлинии и общей полноты: 1 – площадь КВЛ, B – ширина судна, КВЛ – конструктивная ватерлиния, L – длина судна, T – осадка судна, 1 – подъем скулы, 2 – площадь мидель-шпангоута, 3 – радиус закругления скулы, B – ширина судна

При больших L/B (длинные узкие суда) коэффициенты полноты мидель-шпангоута или общей полноты могут быть больше, чем при малом L/B (короткие широкие суда); при этом обводы не становятся полнее.

Указанные выше коэффициенты полноты взаимосвязаны, поэтому их нельзя выбирать произвольно. Перечисленные характеристики

формы (относительные величины и коэффициенты полноты) во многом определяют поведение судна в море, сопротивление движению и рентабельность судов и, кроме того, взаимно влияют друг на друга [2].

Полезная мощность, развиваемая винтом, рассчитывается по формуле (4)

$$N_{\Pi} = P_E (1-t) \frac{V_A}{1-w}, \quad (4)$$

где P_E – упор винта,

w – коэффициент попутного потока,

t – коэффициент засасывания

Упор винта P_E рассчитывается по формуле (5)

$$P_E = \frac{R}{1-t}. \quad (5)$$

Каждый двигатель имеет свою так называемую внешнюю характеристику – зависимость снимаемой с вала мощности от частоты вращения коленчатого вала при полностью открытом дросселе карбюратора. Такая характеристика для подвесного мотора «Вихрь», например, показана на рис. 4 (кривая 1). Максимум мощности в 21,5 л.с. двигатель развивает при 5000 об./мин.

Мощность, которая поглощается на данной лодке гребным винтом в зависимости от частоты вращения мотора, показана на рис. 4 не одной, а тремя кривыми – винтовыми характеристиками 2, 3 и 4, каждая из которых соответствует определенному гребному винту, т. е. винту определенного шага и диаметра.

При увеличении и шага, и диаметра винта выше оптимальных значений лопасти захватывают и отбрасывают назад слишком большое количество воды: упор при этом возрастает, но одновременно увеличивается и потребный крутящий момент на гребном валу.

Винтовая характеристика 2 такого винта пересекается с внешней характеристикой двигателя 1 в точке А. Это означает, что двигатель уже достиг предельного – максимального значения крутящего момента и не в состоянии проворачивать гребной винт с большой частотой вращения, т. е. не развивает номинальную частоту вращения и соответствующую ей номинальную мощность. В данном случае положение точки А показывает, что двигатель отдает всего 12 л.с. мощности вместо 22 л.с. Такой гребной винт называется гидродинамически тяжелым.

Наоборот, если шаг или диаметр винта малы (кривая 4), и упор, и потребный крутящий момент будут меньше, поэтому двигатель не только легко разовьет, но и превысит значение но-

минальной частоты вращения коленвала. Режим его работы будет характеризоваться точкой С. И в этом случае мощность двигателя будет использоваться не полностью, а работа на слишком высоких оборотах сопряжена с опасным большим износом деталей. При этом надо подчеркнуть, что поскольку упор винта невелик, судно не достигнет максимально возможной скорости. Такой винт называется гидродинамически легким [3].

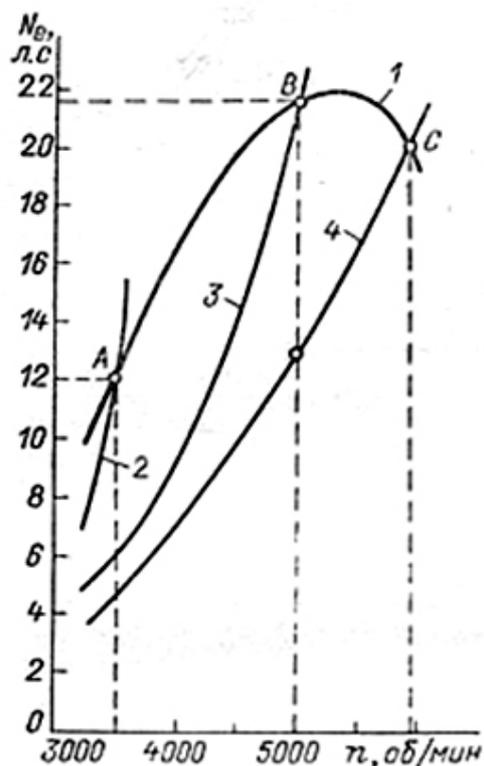


Рис. 4. Внешняя и винтовая характеристики мотора «Вихрь»

Для каждого конкретного сочетания судна и двигателя существует оптимальный гребной винт. Для рассматриваемого примера такой оптимальный винт имеет характеристику 3, которая пересекается с внешней характеристикой двигателя в точке В, соответствующей его максимальной мощности. Рис. 5 иллюстрирует важность правильного подбора винта на примере мотолодки «Крым» с подвесным мотором «Вихрь». При использовании штатного винта мотора с шагом 300 мм мотолодка с 2 чел. на борту развивает скорость 37 км/ч. С полной нагрузкой 4 чел. скорость лодки снижается до 22 км/ч. При замене винта другим с шагом 264 мм скорость с полной нагрузкой повышается до 32 км/ч. Оптимальные же результаты достигаются с гребным винтом, имеющим шаговое отношение $H/D = 1,0$ (шаг и диаметр равны 240 мм): максимальная скорость повышается до

40–42 км/ч, скорость с полной нагрузкой — до 38 км/ч. Несложно сделать вывод и о существенной экономии горючего, которую можно получить с винтом уменьшенного шага. Если со штатным винтом при нагрузке 400 кг расходуется 400 г горючего на каждый пройденный километр пути, то при установке винта с шагом 240 мм расход горючего составит 237 г/км.

При движении у носа и кормы судна создаются волны, которые с увеличением скорости становятся больше. Это объясняется тем, что с увеличением скорости движения в кормовой части судна возникает значительное разрежение, а в носовой — зона повышенного давления. Энергия, израсходованная на образование волн, является волновым сопротивлением, величина которого определяется скоростью и длиной судна. При движении у носа и кормы судна создаются волны, которые с увеличением скорости становятся больше.

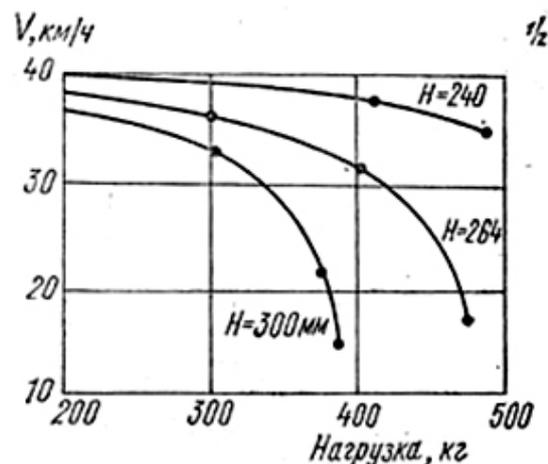


Рис. 5. Зависимость скорости мотолодки «Крым» от нагрузки и шага гребного винта мотора «Вихрь» мощностью 14,8 кВт (20 л.с.)

Характеристикой волнового сопротивления судна является отношение скорости к длине, называемое числом Фруда (6):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}. \quad (6)$$

Эта характеристика позволяет сравнивать суда различных размеров, что дает возможность определить сопротивление и тем самым мощность двигателя для строящегося судна с помощью буксировочных испытаний моделей. Скорости судна и модели соотносятся как квадратные корни из их линейных размеров (7):

$$\frac{v_{\text{судна}}}{\sqrt{gL}} = \frac{v_{\text{модели}}}{\sqrt{gL}}. \quad (7)$$

Это означает, например, что строящемуся судну длиной 130 м, шириной 14 м с осадкой 6,6 м, с водоизмещением 5900 т и скоростью 25 уз (12,86 м/с) соответствует скорость модели 2,572 м/с при длине ее 5,2 м. При этой скорости у модели возникает волнообразование, которое геометрически подобно волнообразованию натурного судна. Измеренное при этом сопротивление содержит, однако, не только волновое сопротивление, но и еще один компонент – сопротивление трения, которое возникает вследствие тормозящего действия воды, протекающей мимо корпуса. Сопротивление трения зависит от площади смоченной поверхности корпуса, от ее качества (степени шероховатости) и от скорости. Его можно рассчитать с достаточной точностью по опытным данным как для модели, так и для судна. Если полное сопротивление модели уменьшить на расчетный коэффициент трения, получится волновое сопротивление модели. При пересчете действует положение, что волновые сопротивления двух геометрических подобных тел – судна и модели – соотносятся как их водоизмещения. Но это простое соотношение справедливо только тогда, когда судно и модель движутся со сравнимыми скоростями, так что возникают геометрически подобные волнообразования. Если к волновому сопротивлению (определенному опытами на модели) прибавить расчетное сопротивление трения, получится полное сопротивление судна. В нашем примере при модельных испытаниях было определено волновое сопротивление в 0,31 МН и путем расчета – сопротивление трения в 0,35 МН. Полное сопротивление судна составляет, таким образом, 0,66 МН. Разумеется, при окончательном определении потребной мощности двигателей нужно учитывать также воздушное и вихревое сопротивления [3].

Доля волнового сопротивления и сопротивления трения в полном сопротивлении зависит

от формы судна и его скорости. У больших тихоходных судов волновое сопротивление составляет примерно 20%, а у очень быстроходных – до 70% полного сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Войткунский Я. И.** Сопротивление движению судов: Учеб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
2. Морской сайт [Электронный ресурс]. [2009] URL: <http://www.seaman-sea.ru> (дата обращения 4.10.2010)
3. Устройство и принцип работы гребного винта [Электронный ресурс]. [2009] URL: <http://www.motolodka.ru/> (дата обращения: 4.10.2010).

ОБ АВТОРАХ

Проскурина Наталия Борисовна, магистрант каф. авиац. двигателей. Дипл. бакалавр техники и технологии (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. процессов в центробежных компрессорах ГТД с использованием имитационного и 3D-числ. моделирования.

Сенюшкин Николай Сергеевич, доц. каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики, зам. декана ФАД. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. уст. (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по тепл., электротехн. двигателям и энергоустановкам летательн. аппаратов (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. судостроения, проектир. БПЛА и систем упр-я, моделир-я и проектирования камер сгорания авиац. ГТД.

Суханов Андрей Владимирович, магистрант каф. авиац. двигателей. Иссл. в обл. автоматизации процесса испытаний авиационных ГТД.

Ямалиев Руслан Рафаилович, мл. науч. сотр. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-констр. (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. автоматизации испытаний ГТД и проектирования БПЛА.