

УДК 681.5.08

АНАЛИЗ ВИНТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И СОГЛАСОВАНИЕ ГРЕБНОГО ВИНТА И ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Шураев Олег Петрович¹, к.т.н., доцент

e-mail: solwrk@inbox.ru

Самосюк Алина Игоревна¹, к.т.н.

e-mail: aliandrsam@gmail.com

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Выполнен анализ скоростных характеристик главных двигателей судов внутреннего плавания. Показано, что мощность двигателя при работе на установившемся режиме винтовой характеристики может быть представлена в виде произведения трех множителей: постоянной составляющей, частоты вращения вала и коэффициента момента. Коэффициент момента может быть определен как со стороны параметров работы двигателя, так и со стороны параметров винта и движения судна. Значение предельной частоты вращения вала двигателя в швартовном режиме, соответствующее номинальному крутящему моменту двигателя, может быть определено в точке пересечения швартовной характеристики и линии номинального крутящего момента. Отношение коэффициентов момента на швартовной и номинальной винтовой характеристиках определяет величину «утяжеления» швартовной характеристики по отношению к номинальной.

Ключевые слова: скоростные характеристики; винтовая характеристика; швартовная характеристика; топливо-мощностная характеристика; коэффициент момента.

ANALYSIS OF SCREW CHARACTERISTICS AND MATCHING OF THE PROPELLER AND THE MAIN SHIP ENGINE

Oleg P. Shurayev¹, Candidate of Technical Science, Associate Professor

e-mail: solwrk@inbox.ru

Alina I. Samosyuk¹, Candidate of Technical Science

e-mail: aliandrsam@gmail.com

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The analysis of the speed characteristics of the main engines of inland navigation vessels is performed. It is shown that the engine power during steady-state operation of the screw characteristic can be represented as the product of three multipliers: the constant component, the shaft rotation speed, and the torque coefficient. The torque coefficient can be determined both from the side of the engine operation parameters, and from the side of the screw parameters and the movement of the vessel. The maximum rotational speed of the motor shaft in mooring mode, corresponding to the rated torque of the motor, can be determined at the intersection of the mooring characteristic and the line of rated torque. The ratio of the moment coefficients on the mooring and

nominal screw characteristics determines the amount of "weighting" of the mooring characteristic relative to the nominal one.

Keywords: speed characteristics; screw characteristic; mooring characteristic; fuel-power characteristic; torque coefficient.

Введение

Поставленная задача – выполнить анализ скоростных характеристик двигателя, и на его базе рассмотреть согласованность гребного винта и главного двигателя, исходя из сравнения коэффициентов момента, а также рассмотреть построение теоретической швартовной характеристики.

Сопоставление действительной швартовной характеристики, снятой во время швартовных испытаний, и теоретической, построенной на основании параметров двигателя, винта и движения судна, позволяет оценить согласованность гребного винта и главного двигателя по результатам швартовных испытаний до выхода судна на ходовые испытания.

Скоростные характеристики

В отличие от теоретической винтовой характеристики, построение которой не представляет сложности, на параметры теоретической швартовной характеристики влияет большое количество факторов. В доступной литературе отсутствуют рекомендации по построению швартовной характеристики, поэтому целесообразно восполнить этот пробел.

Зависимость параметров рабочего процесса на установившихся режимах от одного из параметров, взятого за аргумент, принято называть характеристикой двигателя. Если в качестве независимого параметра (аргумента) выбрана частота вращения n , то такие характеристики называются скоростными.

В группу скоростных входят характеристики, показывающие мощностные возможности двигателя на указанной частоте вращения в зависимости от цикловой подачи топлива. Мы предлагаем их назвать «топливно-мощностными», что более точно отражает суть этих характеристик.

Второе подмножество скоростных характеристик – винтовые. Они показывают зависимость мощности от частоты вращения гребного винта или имитирующего устройства.

Коэффициент момента при работе по винтовой и швартовной характеристикам

Зависимость мощности при работе двигателя на винт описывается формулой.

$$P_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_v \cdot k_2 \cdot D_{ГВ}^5 \cdot n_{ГВ}^3}{\eta_{П} \cdot \eta_{В}}, \quad (1)$$

где ρ_v – плотность воды; k_2 – коэффициент момента гребного винта; $D_{ГВ}$ – диаметр гребного винта; $n_{ГВ}$ – частота вращения гребного винта (при прямой передаче равна частоте вращения коленчатого вала, при зубчатой – пропорциональна); $\eta_{П}$ и $\eta_{В}$ – КПД передачи и валопровода соответственно.

Если неизменные компоненты в формуле (1) представить в виде константы $C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho_v \cdot D_{ГВ}^5}{\eta_{П} \cdot \eta_{В}} = const$, то мы получим зависимость мощности от частоты вращения, этой константы и коэффициента k_2 , который называют коэффициентом момента. При известных



значениях константы C , мощности P_e и частоты вращения $n_{ГВ}$ из формулы (1) можно вычислить коэффициент k_{2E} для, например, номинального режима работы двигателя.

$$k_{2E} = \frac{P_e}{C \cdot n_{ГВ}^3}. \quad (2)$$

С другой стороны, коэффициент k_2 может быть определен по известным в справочной литературе диаграммам Э.Э. Папмеля [1] для расчета гребных винтов. В частности, по машинной диаграмме при заданных характеристиках двигателя. В ходе расчета определяется относительная поступь λ для винта с заданным количеством лопастей z , дисковым отношением θ , шаговым отношением H/D .

Аппроксимация диаграмм Э.Э. Папмеля выполнена в пособии [2]. Это позволило в расчете отказаться от скалывания значений с графиков, заменив эту процедуру расчетом по уравнению (3):

$$k_2(HD, \lambda) = C_1 + C_2 \cdot HD + C_3 \cdot \lambda + C_4 \cdot HD^2 + C_5 \cdot HD \cdot \lambda + C_6 \cdot \lambda^2 + C_7 \cdot HD^3 + C_8 \cdot \lambda^2 \cdot HD + C_9 \cdot \lambda^3 + C_{10} \cdot HD^2 \cdot \lambda^2, \quad (3)$$

где C_i – аппроксимационные коэффициенты для винтов с заданным количеством лопастей z и дисковым отношением θ .

Для винтов фиксированного шага отношение H/D является неизменным, поэтому в формуле (3) коэффициент k_2 будет зависеть только от относительной поступи λ . Относительная поступь определяется по выражению $\lambda = \frac{w}{n_{ГВ} \cdot D_{ГВ}}$, в котором скорость набегания потока на винт w выражается через скорость судна и коэффициент попутного потока [3]. Таким образом, может быть определен коэффициент момента k_{2p} исходя из параметров винта и условий его работы.

Сопоставление коэффициентов k_{2E} и k_{2p} позволяет оценить согласованность винта и двигателя [4]. Если выполняется условие равенства коэффициентов k_{2E} и k_{2p} , то гребной винт и двигатель согласованы. В случае, когда $k_{2E} > k_{2p}$ винт является гидродинамически «легким», а если $k_{2E} < k_{2p}$ – гидродинамически «тяжелым».

Швартовная характеристика является наиболее гидродинамически тяжелой винтовой характеристикой, но также описываемой уравнением (1). Ключевым отличием швартовной характеристики будет равенство нулю скорости судна, а следовательно, и равенство нулю относительной поступи винта λ . При уменьшении относительной поступи коэффициент момента k_2 увеличивается. Максимальным значение k_2 будет когда судно неподвижно, то есть при работе по швартовной характеристике: $k_{2ш} = k_{2max}$. Это условие и будет использовано при построении швартовной характеристики.

Построение теоретической швартовной характеристики для судов различных типов

Для оценки согласованности гребного винта и главного двигателя были рассмотрены два проекта транспортных судов, имеющих близкие параметры корпуса и одинаковые главные двигатели. На пассажирском (проект 588) и грузовом (проект 576) теплоходах установлены главные двигатели марки 6NVD48 мощностью 294 кВт каждый. На пассажирском судне – три двигателя, на грузовом – два.

Геометрические параметры гребных винтов данных судов имеют достаточно близкие значения (таблица 1). Принципиальная разница заключается в типе движителя: на пассажирском теплоходе винт открытый, на грузовом – в насадке.

Таблица 1. Параметры винтов пассажирского и грузового теплоходов



Параметр	Размерность	Значение	
		Проект 588	Проект 576
Тип винта	-	открытый	в неподвижной насадке
Количество лопастей, z	-	4	4
Дисковое отношение, θ	-	0,55	0,55
Диаметр, D	мм	1600	1590
Шаг, H	м	2,02	1,92
Шаговое отношение, H/D	-	1,262	1,208

Для гребных винтов, установленных на судах рассматриваемых проектов, значения аппроксимационных коэффициентов в уравнении (3), связывающем коэффициент момента k_2 и относительную поступь винта λ , приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты в уравнении (3) согласно [2]

Коэффициент	Значение для открытого винта с $z = 4$, $\theta = 0,55$	Значение для винта в насадке с $z = 4$, $\theta = 0,55$
C_1	-0.001750186	0.034230315
C_2	0.012445675	-0.083384194
C_3	0.000244777	0.006949658
C_4	0.055554854	0.105885305
C_5	-0.029986548	-0.028115195
C_6	-0.014026910	-0.015812053
C_7	-0.007269725	-0.014283056
C_8	-0.007686874	0.029349117
C_9	-0.006060740	-0.028368415
C_{10}	0.008546909	-0.00444762

Из Руководства по теплотехническому контролю серийных теплоходов [5] взяты зависимости скорости судна и суммарной мощности главной энергетической установки с двигателями 6NVD48 мощностью 294 кВт каждый от частоты вращения для пассажирского судна (пр. 588) и грузового (пр. 576). Эти кривые оцифрованы в программе GetData и аппроксимированы полиномиальными зависимостями (4) - (7).

Для проекта 588:

$$P_{e\Sigma} = 0.000185 \cdot n^3 - 0.079763 \cdot n^2 + 13.602853 \cdot n - 709.7, \quad (4)$$

коэффициент детерминации $R^2=0,994$,

$$v = 0.0841 \cdot n + 1.654, (R^2 = 0,999). \quad (5)$$

Для проекта 576:

$$P_{e\Sigma} = -0.00001 \cdot n^3 - 0.03101 \cdot n^2 + 7.99128 \cdot n + 620.53, \quad (R^2 = 0,999) \quad (6)$$

$$v = 0.0617 \cdot n + 1.989, (R^2 = 0,999). \quad (7)$$



Высокие значения коэффициентов детерминации подтверждают корректность выбора уравнений.

Полученные уравнения позволяют связать скорость судна и соответствующую ей мощность главных двигателей с частотой вращения коленчатого вала двигателя.

Сравнивая отдельные кинематические и динамические характеристики гребных винтов судов двух типов, можно заметить существенную разницу значений коэффициента попутного потока, обусловленную различием формы и полноты корпуса этих судов. Принимая во внимание, что коэффициент попутного потока грузового судна примерно вдвое выше, чем пассажирского, и учитывая, что скорость хода пассажирского судна значительно выше, чем у грузового, получим существенную разницу значений скорости потока, набегающего на винт.

Однако величина коэффициента момента k_2 имеет достаточно близкие значения.

Таблица 3. Расчетные величины в режиме номинальной винтовой характеристики

Параметр	Теплоход проекта 588	Теплоход проекта 576
Коэффициент попутного потока ψ	0.11	0.26
Скорость набегающего потока на винт, м/с	6.125	3.895
Относительная поступь	0.835	0.535
Коэффициент k_{2E} для двигателя (формула (2))	0.0457	0.0471
Коэффициент k_{2p} для винта по диаграммам Папмеля, (формула (3))	0.0459	0.0479

Это обусловлено тем, что согласованность работы гребного винта и главного двигателя оценивается сопоставлением коэффициентов k_{2E} и k_{2p} для винта и двигателя, а двигатели на рассматриваемых судах одинаковые, поэтому результаты выполненных расчетов показали достаточно близкие значения коэффициента момента в режиме номинальной винтовой характеристики. Для пассажирского судна разница k_{2E} и k_{2p} составила 0,0002, а для грузового – 0,0008 (в относительном выражении это составило 0,4 % и 1,36 %), что позволяет считать винты согласованными с главными двигателями для судов вышеуказанных проектов.

Затем были рассчитаны для каждого судна коэффициенты момента $k_{2ш}$ при работе по швартовной характеристике. Это позволило построить швартовные характеристики для каждого судна, так как отличие уравнения швартовной характеристики от уравнения номинальной винтовой заключается в значении коэффициента момента: вместо k_{2E} используется $k_{2ш}$.

Если записать уравнение номинальной винтовой характеристики (1) в виде

$$P_e = C \cdot k_{2E} \cdot n_{ГВ}^3, \quad (8)$$

а уравнение швартовной характеристики в виде

$$P_{eш} = C \cdot k_{2ш} \cdot n^3, \quad (9)$$

то разделив уравнение (9) на уравнение (8) и выразив $P_{eш}$, получим формулу

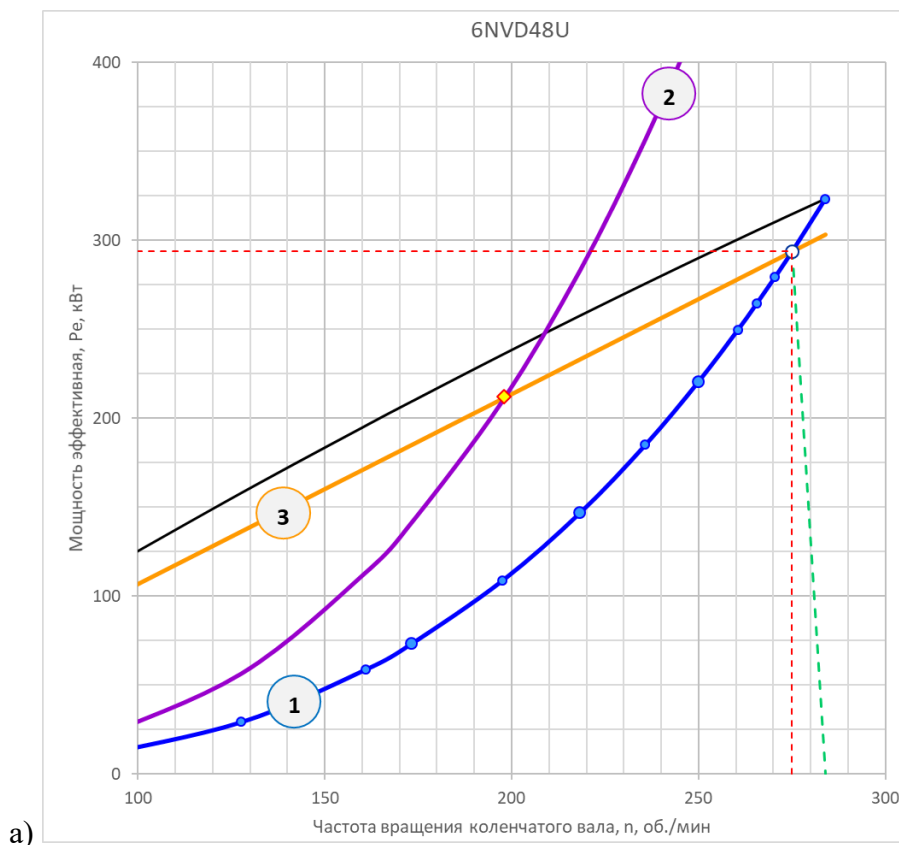
$$P_{e_{ш}} = \frac{k_{2ш}}{k_2} \cdot P_{e_{ном}} \cdot \left(\frac{n}{n_{ном}} \right), \quad (10)$$

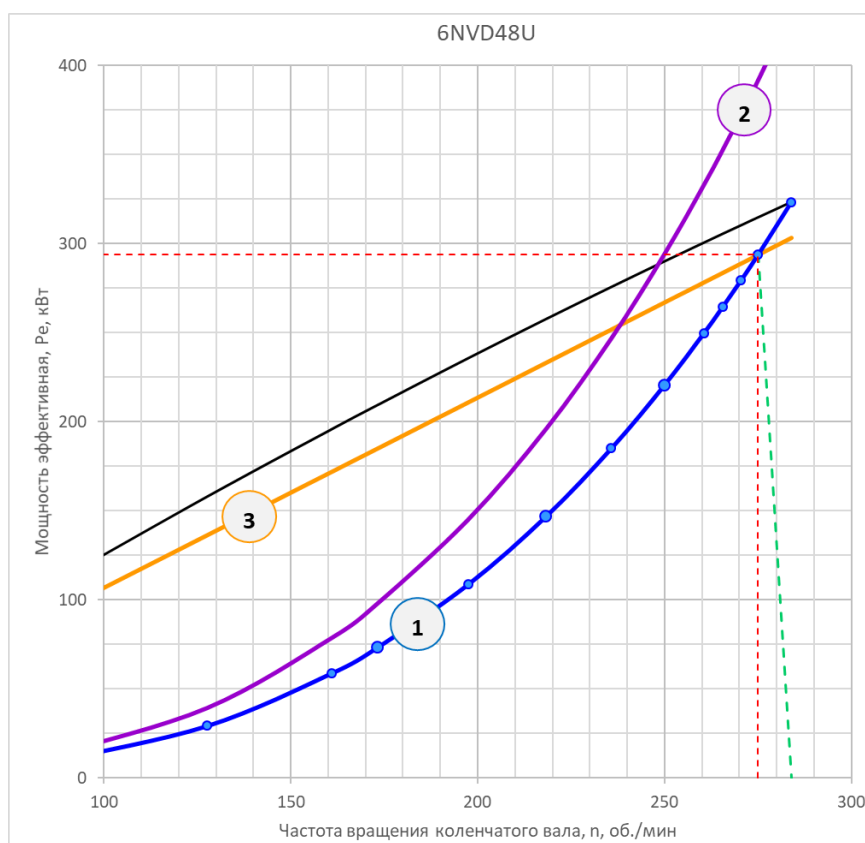
в которой отношение коэффициентов момента на швартовной и номинальной винтовой характеристиках показывает величину «утяжеления» швартовной характеристики по отношению к номинальной. Она составила 1,92 для пассажирского теплохода и 1,33 для грузового.

Отдельным острым вопросом при проведении швартовных испытаний является определение предельной частоты вращения вала двигателя. Для этого необходимо найти точку пересечения швартовной характеристики и характеристики постоянного (номинального) крутящего момента, то есть, решить систему двух уравнений:

$$\begin{cases} P_{e_{ш}} = C \cdot k_{2ш} \cdot n_{ш}^3 - \text{уравнение швартовной характеристики} \\ P_{e_{ш}} = P_{e_{ном}} \cdot \frac{n_{ш}}{n_{ном}} - \text{уравнение постоянного крутящего момента} \end{cases} \quad (11)$$

На рисунке представлены скоростные характеристики для двигателей судов рассматриваемых проектов: номинальная винтовая, швартовная, а также ограничительная по номинальному крутящему моменту, и показана точка, соответствующая предельной частоте вращения вала двигателя в швартовном режиме. Для пассажирского теплохода это значение составило 198 об/мин, для грузового – 238 об/мин.





б) Рисунок 1 – Характеристики двигателя 6NVD48: а) на пассажирском судне проекта 588; б) на грузовом судне проекта 576: 1 – номинальная винтовая характеристика, 2 – швартовная характеристика, 3 – линия номинального крутящего момента

Сравнение швартовных характеристик судов двух проектов показывает более резкое возрастание мощности при работе по швартовной характеристике у пассажирского теплохода по сравнению с грузовым. Таким образом, можно сказать, что открытый винт пассажирского судна нагружает двигатель при работе по швартовной характеристике более интенсивно, чем винт в насадке грузового теплохода.

Выводы

1. Предложено назвать семейство характеристик, показывающих мощностные возможности двигателя на указанной частоте вращения в зависимости от цикловой подачи топлива «топливно-мощностными», что более точно отражает суть этих характеристик.
2. Показана зависимость винтовых характеристик, включая швартовную, от коэффициента момента.
3. Предложен способ построения швартовной характеристики, использующий заданные параметры двигателя и гребного винта.
4. Определено значение предельной частоты вращения вала двигателя в швартовном режиме, соответствующее номинальному крутящему моменту двигателя.
5. Показано, что отношение коэффициентов момента на швартовной и номинальной винтовой характеристиках определяет величину «утяжеления» швартовной характеристики по отношению к номинальной.

Список литературы:

1. Руководство по расчету и проектированию гребных винтов судов внутреннего плавания. Приложение. / Под ред. А.М. Басина, Е.И. Степанюка. – Л.: Транспорт, 1977. – 40 с.
2. Расчет движительного комплекса винтового судна. / А.Г. Ряйсянен. - Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2013. – 39 с. (https://togudv.ru/media/filer_public/2013/02/19/tus_my-kr.pdf) (дата обращения: 27.03.2026)
3. Басин А.М., Миниович И.Я. Теория и расчет гребных винтов. Л.: Судпромгиз, 1963. – 759 с.
4. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1977. – 455 с.
5. Руководство по теплотехническому контролю серийных теплоходов. – М.: Транспорт, 1980, 424 с.

