

**ZESZYTY NAUKOWE NR 1(73)  
AKADEMII MORSKIEJ  
W SZCZECINIE**

---

**EXPLO-SHIP 2004**

---

Сергей Дятченко, Владимир Загацкий, Владимир Пухов

**Исследование влияния гребных винтов  
на вибрацию судов типа СРТМ**

Ключевые слова: корпус судна, гребной винт, отклонения параметров гребных винтов от проектных значений, вибрация судов

*На примере судна типа СРТМ пр. 502 показано, что повышенная вибрация в жилых помещениях обусловлена, в большей степени, воздействием возмущающих сил индуцируемых гребным винтом. Установлено, что наибольшие усилия передаются корпусу судна с лопастной и удвоенной лопастной частотой. Рассчитаны амплитуды возмущающих усилий первого и четвертого порядков.*

**A Study of the Influence of Screw Propeller on Vibrations  
of a SRTM Type Ship**

Key words: ship hull, screw propeller, deflections of parameters of screw propellers from the designed ones, vibration of the ship hull

*This case study, involving a ship of the STRM type, has shown that increased vibrations in crew accommodations to a large extent depend on stresses exerted by the screw propeller. It has been found that the frequency of propeller blades and its second harmonic have the largest effect on ship hull. The amplitudes of the first and fourth order stresses were calculated.*

## Введение

Важной социальной задачей является обеспечение нормальной жизнедеятельности людей на судах. Известно, что вибрационные условия зависят от многих факторов, таких как: конструктивных особенностей судна, режимов его эксплуатации и состояния загрузки, демпфирующих характеристик, а также возмущающих усилий, возникающих при работе судовой энергетической установки и гребного винта. Все это вызывает объективные трудности обеспечения допустимых уровней вибрации на судах. Связано это в первую очередь с тем, что поскольку спектр собственных частот колебаний судовых конструкций и возмущающих усилий имеют широкие диапазоны, возможны резонансные явления. В работе представлен анализ вибрационной обстановке на судах типа СРТМ и выполнена оценка влияния гребного винта на вибрацию судна.

## Экспериментальное исследование

Для оценки вибрационных условий обитаемости в рамках санитарных норм (СН-1103-73) выполнены экспериментальные исследования вибрации на СРТМ-8063 пр. 502 Э.

Измерения низкочастотной вибрации проводились на номинальном режиме работы энергетической установки при ходе судна прямым курсом и волнении моря не превышающем трех баллов. На рис. 1 приведены гистограммы распределения уровней вибрации, характеризующие вибрационные условия обитаемости в жилых помещениях судна. Гистограммы даны для каждой октавной полосы нормируемого диапазона частот с указанием санитарной нормы. По оси ординат отложены значения  $p_i$  выражающее в процентном отношении количество членов экипажа, подверженных воздействию вибрации. Как показал анализ, в жилых помещениях более 80-ти процентов членов экипажа подвержены воздействию вибрации, превышающей санитарные нормы. При этом недопустимая с точки зрения санитарных норм вибрация в жилых помещениях судна наблюдалась в частотном диапазоне октавных полос 32 и 63 Гц.

Основными источниками низкочастотной вибрации на судне данного проекта являются четырехлопастной винт и четырехтактный главный двигатель типа 8NVD48AU с номинальным числом оборотов  $n = 375$  об/мин. Возмущающие усилия от гребного винта как правило передаются на корпус судна с частотой соответствующей номинальному числу оборотов гребного винта и лопастной частотой –  $k \cdot 4n$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$

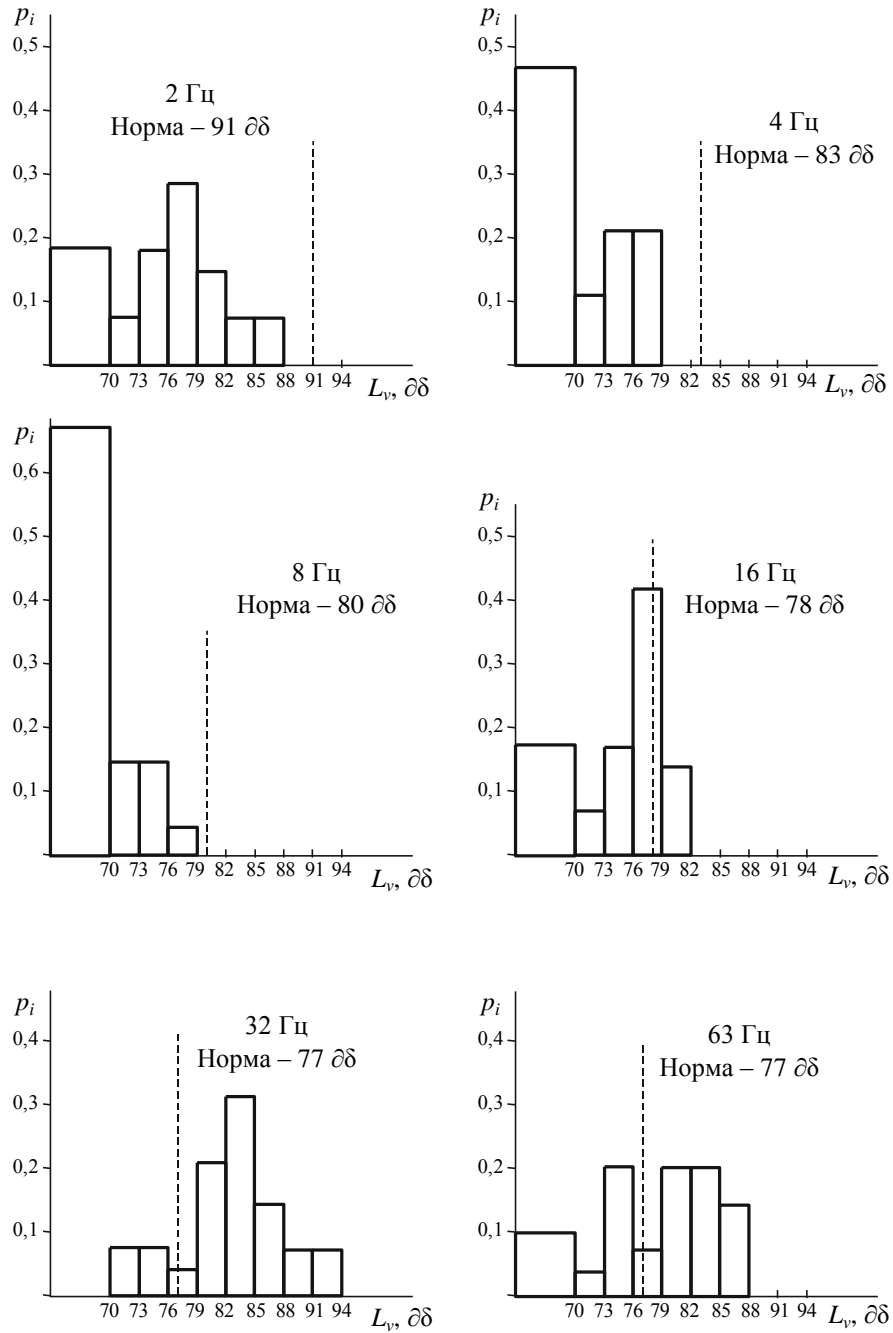


Рис. 1. Распределение уровней вибрации в жилых помещениях  
 Fig.1. Distribution of vibration levels in crew accommodations

У четырехтактного главного двигателя возмущающие усилия, возникающие при его работе и передающиеся на корпусные конструкции судна характеризуются частотами равными и кратными числу оборотов коленчатого вала. Поскольку для СРТМ данного проекта число оборотов коленчатого и гребного валов одинаковы, т.е. частоты их возмущающих сил могут частично совпадать, были проведены исследования по оценке влияния главного двигателя и винта на вибрацию корпуса судна. Исследования включали: замеры параметров вибрации на полном ходу вдоль корпуса судна с 40 по 80 шпангоуты, замеры параметров вибрации на лапах главного двигателя и замеры при нулевом развороте ВРШа. На рис. 2 представлено распределение колебаний наиболее существенных порядков вдоль правого борта судна. Следует отметить, что подобный характер распределения параметров вибрации отмечен и на других судах СРТМ. Так на рис. 3 представлено распределение колебаний различных порядков вдоль главной палубы СРТМ 8032. Выполненные исследования показали, что на лапах главного двигателя определяющим является четвертый порядок по отношению к оборотам коленчатого вала. Все остальные порядки, возбуждаемые главным двигателем, по меньшей мере, в 3 раза меньше. Сравнение амплитуд колебаний палубы, например, в салоне команды, на полном ходу и при нулевом развороте ВРШа показало, что колебания четвертого порядка в равной мере возбуждаются как главным двигателем, так и гребным винтом, а восьмой порядок – только винтом. Таким образом, винт индуцирует периодические возбуждающие усилия лопастной и удвоенной лопастной частоты. Выше отмечалось, что превышение нормативных уровней вибрации в судовых помещениях зарегистрировано в октавных полосах 32 и 63 Гц. Учитывая, что частота колебаний четвертого порядка лежит в частотном диапазоне октавы 32 Гц, а восьмого порядка – в полосе 63 Гц, можно заключить, что гребной винт оказывает существенное влияние на вибрацию корпуса судна данного проекта.

### **Расчет усилий первого и четвертого порядков**

Возмущающие усилия первого порядка являются в основном следствием гидродинамической неуравновешенности гребного винта, которая обусловлена расхождением по шагу его лопастей и отклонениями центральных углов между ними от номинальных значений. При этом из-за разношаговости лопастей винта помимо неуравновешенной поперечной силы на гребном винте возникает также неуравновешенный изгибающий момент, который передается корпусу судна в виде реакций на подшипники

валопровода. Однако, как показывают результаты расчетов, поправка при учете дополнительных реакций, возникающих от этого изгибающего момента, не превышает 1% от общей неуравновешенной силы первого порядка, вследствие чего им можно пренебречь.

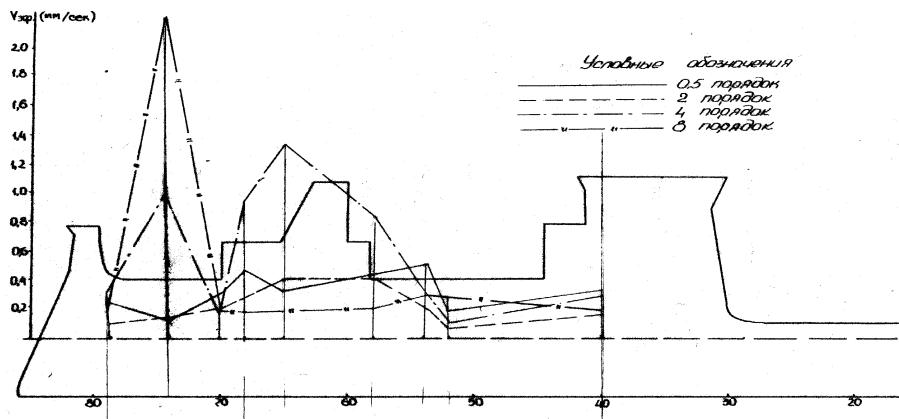


Рис. 2. Распределение колебаний различных порядков вдоль правого борта СРТМ-8063  
Fig. 2. Distribution of the stress fluctuations of different orders along the starboard side of the SRTM-8063 ship

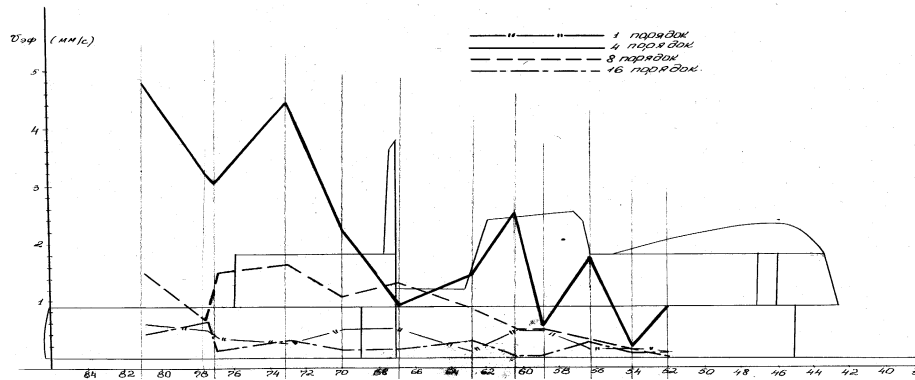


Рис. 3. Распределение колебаний различных порядков вдоль главной палубы на СРТМ-8032  
Fig. 3. Distribution of the fluctuations of different orders along the main deck on the SRTM-8032

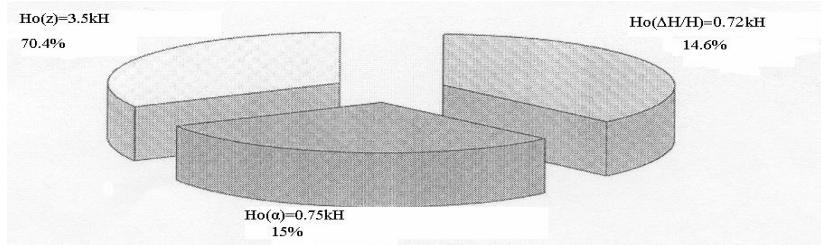


Рис. 4. Усилия, передаваемые от гребного винта корпусу судна  
 Fig. 4. Stress transferred from the screw propeller to the ship hull

На основе статистических данных можно принять, что максимальные отклонения от номинальных значений по шагу могут составлять 5%, а по углу – до 2-х градусов. Как показывает опыт эксплуатации, большая часть гребных винтов для судов данного типа имеет разношаговость  $\approx 3\%$  и отклонения центральных углов  $\approx 1\%$ . Эти величины заложены в расчет усилий первого порядка. При расчете периодических усилий, передаваемых корпусу судна работающим гребным винтом, лопасти которого имеют расхождения по шагу, используются известные зависимости, полученные Н. Н. Бабаевым при некоторых допущениях. Обычно эти допущения являются вполне оправданными, поскольку в достаточной степени приближенный характер расчетов вынужденной вибрации корпуса судна не требует обеспечения той точности, которую могут дать расчеты действия винта по вихревой теории. Вместе с тем, для некоторых гребных винтов пренебрежение такими факторами, как конечность числа лопастей и искривление потока между ними, приводит к неоправданному завышению возмущающих усилий. Вследствие этого выполнен расчет возмущающих усилий обусловленных разношаговостью лопастей по методике В.С. Акулаева. В основу методики положена гипотеза квазистационарности усредненных значений скоростей в пределах лопасти. Это допущение приводит к незначительному изменению гидродинамических характеристик гребного винта.

Формула для определения амплитуды возмущающих усилий имеет вид:

$$H_0 = \bar{H}_0 \left( z; \frac{H}{D}; \frac{A}{A_d} \right) \cdot 10^{-3} \rho \omega^2 R^4 = 0,56 \cdot 10^{-3} \cdot 1,025 \cdot 39,25^2 \cdot 0,94^4 = 0,72 \text{ кН}$$

где:

$\bar{H}_0 = 0,56$  – безразмерные усилия, снимаемые с графиков;

$\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$  – массовая плотность воды;

$\omega = 39,25 \text{ с}^{-1}$  – угловая скорость вращения винта;  
 $R = 0,95 \text{ м}$  – радиус винта.

Вследствие отклонения центрального угла между лопастями даже в допускаемых пределах ( $\pm 1^\circ$ ) появляется неуравновешенная периодическая сила с частотой первого порядка, которая вполне соизмерим с возмущающей силой, возникающей из-за расхождения по шагу лопастей гребного винта. Величину этой силы можно определить, если подсчитать силы сопротивления вращению лопастей  $Q$  и спроектировать, затем их на координатные оси с учетом возможных отклонений центральных углов между лопастями.

Амплитуду возмущающей силы, обусловленной отклонением от номинального центрального угла между лопастями можно вычислить по следующей формуле:

$$H_0(\alpha) = Q \cdot \sqrt{\left(\sum_2^z \sin \alpha_{1k}\right)^2 + \left(\sum_2^z \cos \alpha_{1k} + 1\right)^2}$$

где:

$\alpha_{1k}$  – фактический угол между первой и  $k$ -й лопастями.

Сила сопротивления вращению лопасти с достаточной для практических целей точностью может быть определена по формуле:

$$Q = 3,2 \cdot \rho \cdot K_2 \cdot n^2 \cdot \frac{D^4}{z} = 43 \text{ кН},$$

где:

$K_2 = 0,103$  – коэффициент момента, определяемый по кривым действия винта;

$D = 1,9 \text{ м}$  – диаметр винта;

$z = 4$  – число лопастей.

$$H_0(\alpha) = 43 \cdot \sqrt{0,579 \cdot 10^{-6} + 0,304 \cdot 10^{-3}} = 0,75 \text{ кН}.$$

Общая величина гидродинамической неуравновешенной силы с частотой первого порядка должна находиться суммированием абсолютных величин неуравновешенных усилий, обусловленных разношаговостью лопастей и отклонениями центральных углов между ними:

$$[H_0]_{\text{сум}} = H_0 \left( \frac{\Delta H}{H} \right) + H_0(\alpha) = 0,72 + 0,75 = 1,47 \text{ кН}.$$

Периодические усилия с частотой, кратной числу лопастей гребного винта, передаются корпусу судна двумя путями: через подшипники линии валопровода и через воду. Возмущающие усилия, возникающие на лопастях гребного винта при работе его в неравномерном поле скоростей и передающиеся корпусу судна через подшипники, определяются главным образом степенью и характером неравномерности поля скоростей в диске винта и очень незначительно зависят от отклонений его геометрических размеров. При расчете этих усилий необходимо иметь в виду, что пульсация силы упора каждой лопасти винта в условиях неравномерного поля скоростей может привести к значительному по величине неуравновешенному изгибающему моменту, возникающему в плоскости диска гребного винта и передающемуся на корпус судна в виде дополнительных реакций на подшипники.

Равнодействующая пульсирующих гидродинамических давлений, передаваемых корпусу судна через воду, зависит в основном от степени неравномерности поля скоростей в диске винта и от величины относительного зазора между крайней точкой лопасти и поверхностью корпуса в районе расположения гребного винта.

Амплитуда возмущающих усилий, передаваемых корпусу судна работающим z-лопастным винтом, определяется по формуле:

$$H_0 = \frac{k}{8\pi^2} \frac{\delta n^2 D^6}{R^2 - R_0^2} K_1(\lambda_p) C_2(r'/R) \Delta_{22}(\alpha) \left\{ 1 + \Delta_4(r'/R) \left[ \frac{K_1(\lambda_p^{**})}{K_1(\lambda_p)} - 1 \right] \right\}$$

где:

- $\delta$  – плотность воды;
- $k$  – коэффициент, учитывающий число лопастей гребного винта;
- $n$  – число оборотов винта;
- $R$  – радиус винта;
- $R_0$  – радиус переходной части от винта к втулке;
- $D$  – диаметр винта;
- $r'$  – расстояние от оси винта до поверхности корпуса;
- $\lambda_p$  – относительная поступь винта;
- $\lambda_p^{**}$  – относительная поступь винта с учетом неравномерности поля скоростей в диске винта;
- $K_1(\lambda_p)$  – коэффициент упора винта;
- $\alpha$  – угол наклона оси винта к поверхности корпуса;
- $\Delta_{22}(\alpha)$  – коэффициент, учитывающий угол наклона винта;



$C_2(r'/R)$  – коэффициент, учитывающий величину зазора между винтом и корпусом;

$\Delta_4(r'/R)$  – коэффициент, учитывающий неравномерность поля скоростей в диске винта.

В расчете использованы следующие данные для проекта 502Э:

$$\lambda_p^{**} = 0,32; \Delta_{22}(\alpha) = 1,1; C_2(r'/R) = 0,7; \Delta_4(r'/R) = 3,4.$$

$$H_0 = 3,5 \text{ кН}$$

На рис. 4. показаны амплитуды усилий первого и четвертого порядков, передаваемые от гребного винта корпусу судна. При этом возмущающие усилия первого порядка разделены на две составляющие: амплитуду, вызванную разношаговостью  $H_0 = \Delta H/H = 0,72$  кН и амплитуду, связанную с отклонением от номинального центрального угла  $H_0(\alpha) = 0,75$  кН.

## **Выводы**

В результате проведенных исследований установлено, что для судов СРТМ повышенная вибрация в жилых помещениях обусловлена в основном возмущающими усилиями, возникающими при работе гребного винта с лопастной частотой четвертого и восьмого порядков.

*Wpłynęło do redakcji w lutym 2004 r.*

## **Recenzenci**

prof. dr hab. inż. Stefan Żmudzki  
dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM

## **Adresy Autorów**

Sergei Diachenko  
Vladimir Zagatskii  
doc. dr inż. Vladimir Pukhov  
Kaliningradzki Państwowy Uniwersytet Techniczny  
Instytut Siłowni Okrętowych i Energetyki Ciepłej  
236000 Kaliningrad, Rosja, ul. prof. Baranowa 43