

1. INTRODUCTION

The use of screw propellers with shifted blade connection (PSBC) results in improving of a number of blade propellers performance characteristics i.e.:

- decrease propeller's vibroactivity [1];

- improve cavitation characteristics of propeller according to the initial forms of cavitations [2];

- improve hydrodynamics efficiency of contra rotating propellers at variable mode of operation [3, 4];

- ensure in wide range of propeller loads correlation between propeller and main engine [5].

The last of the listed functions of the PSBC allows in some cases to consider it as similar to control pitch propeller (CPP). Naturally this feature makes the PSBC look like an alternative technical solution in relation to the CPP and taking into account its comparative simplicity, reliability and cost turns it into a very attractive propeller for designers. The PSBC has only one disadvantage compared to a CPP: to reverse a ship it is necessary, like in case with fixed pitch propellers to change the direction of propeller shaft rotation. Such procedure takes much time and results in a rather large distance of ship stopping which does not contribute to the safety of navigation. However the above mentioned drawback of PSBC is negligible if the PSBC is mounted on steering thruster taking into consideration that stopping and reverse of a ship is carried out by rotating it around for 180° and without propeller shaft reversing which takes less time and shortens stopping distance.

2. DESCRIPTION OF PROPELLER DESIGN AND PRINCIPAL OF OPERATION

In the formula of claim for patent the construction screw steering thruster with PSBC is described in such a way [6].

“Ship propeller arrangement of type “steering thruster”, including one or two propellers with transmission placed in flow around casing, differing by blades concerned at least with one propeller connected with hub movably with the able of displacement them relative to propeller disk by rotating it around axis going through root part of blade and (or) displacement it along this axis. As an example a steering thruster with two contra rotating PSBCs is shown in the fig.1.

It operates as follow: the ship engine (is not shown in the figure) through mechanical transmission (it is possible to use electrical one) including hollow shaft 1 and shaft 2 drives the propellers. The shifting blade 3 of the stern propeller is effected by centrifugal Q_c and hydrodynamic Q_H moments relative to the shaft 4 (see fig. 2.) caused by centrifugal and hydrodynamics forces.

The moments are contra acting and the relative displacement of blade 3 of the stern propeller 5 in the direction opposite to its rotation together with the propeller corresponds to the increasing moment of centrifugal force and decreasing of hydrodynamic force moment as the arm of centrifugal force is increasing and pitch is decreasing . When the blade 3 deflects in the opposite direction the picture is quite different. So the position of blade 3 on the hub is defined by the equality of contra acting moments. The similar statement is true for the bow propeller 6. Depending on the mode of the

EFFICIENCY ESTIMATION OF VARIABLE PITCH PROPELLER ON STEERING THRUSTER*

Leonid I. Vishnevsky, D.Sc, Krylov Shipbuilding Research Institute,
Viktor E. Krasavtsev, Ph.D, State Research and Design Institute for Fishing Fleet, GIPRORYBFLOT,

Anatolij-Branko R. Togunjac, Ph.D, State Research and Design Institute for Fishing Fleet, GIPRORYBFLOT

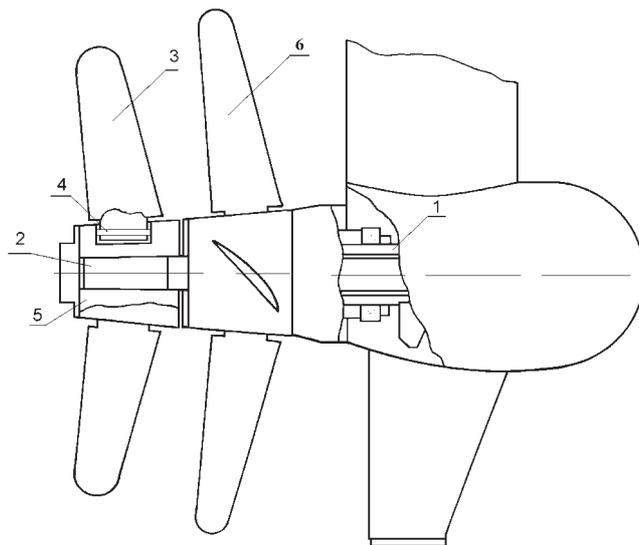


Fig.1. Steering thruster with contra rotating PSBCs

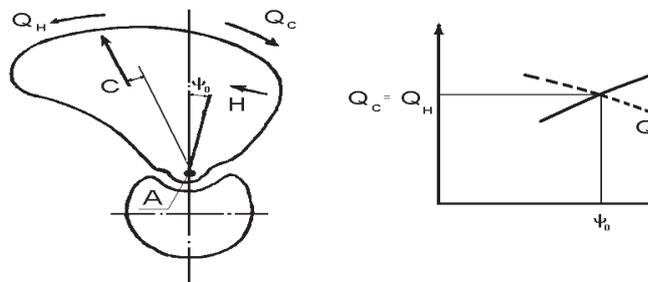


Fig. 2. Scheme of forces effecting the shifted blade

propulsion plant performance i.e. propeller load, the positions of blades will be different. It results in the changing of geometric characteristics of the blade and, correspondingly in the changing of its hydrodynamics characteristics bringing into correspondence performance characteristics of screw and engine and excluding the necessity to use a CPP for this purpose. For contra rotating propellers it is especially important as the of CPPs for this type of propeller is extremely difficult due to complicated technical solution. (The authors have never faced with the use of a CPP in such situation).

Due to rotation of steering thruster for manage to maneuver ship the blades of PSBC are placed in oblique flow and oscillate at the frequency of rotation of shaft line. This mode

* This article was presented by the authors as paper on XVI Symposium on Theory and Practice of Shipbuilding-SORTA-2004 (Plifvice Lakes, Croatia, 21-23 October, 2004).

is after-resonance in relation to nature blade frequency. The last is considered as solid body oscillation on the hub relative to point A (fig.2). It allows not only to remove a variable hydrodynamic load with torque but also makes it possible to exclude transverse forces arising in case of the PSBC operation in oblique flow and, as a result, to decrease the hydrodynamic torque necessary to rotate the steering thruster being used as a steering device during the ship's motion.

The mechanism of transverse force arising on a traditional screw propellers operating in oblique flow is well known. The transverse force arises due to tangential force providing the torque relative of propeller axis. It is less when the blade is moving with oblique flow then quantity of the same force arising on the blade and moving opposite oblique flow. As a result the summarized force named as transverse force does not turn into zero. Similar picture is being watched at the movable blades. However in this case due to oscillating at the after resonance mode an additional inertia force caused by mass of blade and additional water mass is observed. The direction of this force is opposite to variable hydrodynamic force that is why the last may be compensated considerably by the mentioned before. As a result, the transverse force may not be present on the blade of PBSC, which in turn may completely exclude the contribution of transverse force into the hydrodynamic torque arising on the steering thruster.

3. MODEL EXPERIMENT, DESIGN OF SHIFTED BLADE AND EVALUATION OF EFFICIENCY

The results of modal comparative tests in cavitation tunnel of the Krylov Institute illustrate the general picture of hydrodynamics characteristics, see fig. 3, 4.

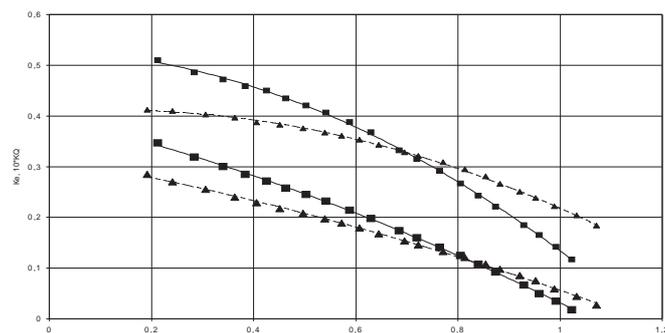


Fig. 3. Hydrodynamics characteristics, FPP (■) and PSBC (▲)

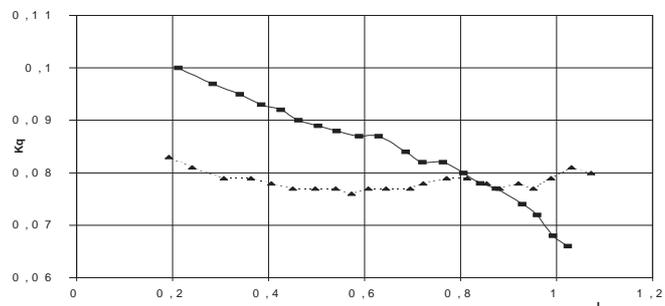


Fig. 4. Changing of coefficient of transverse force, FPP (■), PSBC (▲)

The hydrodynamic curves of PBSC look more flatten then those of the fixed blade propeller (FPP), fig. 3. Geometry of blades of the propellers being compared is similar. The tested PSBC was designed for flow without oblique flow that is why the full compensation of transverse force arising in oblique flow by inertia load are not realized, fig. 4. At the same

time the results show that coefficient of transverse force related to "free" blades in wide range of mode operation (in the range of advance ratio $J = 0.2 \div 0.85$) is less then the same coefficient related to FPP.

Let us find the condition that will be met by the geometry of shifted blade and provided the complete compensation of transverse force by inertial load. The forces being the result of liquid effecting on the blade may be defined according to hydrodynamics characteristics obtained in forward flow depending on the instant advance ratio according to formula

$$J = J_0 \cos \delta / (1 - C \frac{J_0 \sin \delta}{\pi 0.67} \sin \beta) \quad (1)$$

where J_0 – design value of advanced ratio; δ – angle of oblique flow; C – experimental coefficient, defined in depending on the propeller load and oblique flow and taking into account the effect of non-stationary; $\beta = \omega t$ – angle of rotation of blade, ($\omega = 2\pi n$, t – time, n – frequency of rotation propeller).

Knowing the minimum and maximum values of instant advance ratio from the formula (1) it is easy to define the transverse force arising in oblique flow on FPP. It will be equal to:

$$\bar{Z} = \frac{Z}{\rho n^2 D^4} = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{r_0} k = \frac{\Delta K_Q}{0.67} k, \quad (2)$$

where ΔK_Q – range of oscillation of hydrodynamic moment coefficient; Q_{\max} , Q_{\min} – minimum and maximum of values hydrodynamic moment coefficients; $r_0 = 0.67D/2$ (D – propeller diameter); k – coefficient which takes into account the deflection of transverse force from its maximum value which is acting on it during one turn of the propeller.

In case of sinusoidal changing of the force mentioned (which is close to oblique flow) coefficient $k = 0.64$. Thus it may be concluded that

$$\bar{Z} \approx \Delta K_Q \quad (3)$$

In case of shifted blades in propeller disk the inertia moment is acting in the opposite direction relative to the hydrodynamic moment. The quantity of the last relative to the axis of rotation on the hub is defined by the formula

$$Q_I = J_A \psi'' = -J_A A \omega^2 \sin \beta, \quad (4)$$

where A – amplitude of angle blade shifting; J_A – inertia moment of blade together with additional moments relative to axis of its rotation on the hub.

Then, transverse force connected with blade mass and additional mass relative to axis on the hub and directed against to transverse hydrodynamics force is defined with the formula

$$Z_I = \frac{Q_{I\max} - Q_{I\min}}{r_I} = \frac{2J_A A \omega^2}{r_I}, \quad (5)$$

where r_I – inertia reduce of blade together with additional moment of inertia relative to the axis of rotation on the hub.

In case of shifting blades in propeller disk the coefficient of transverse force may be defined as

$$\bar{Z}_\Sigma = \bar{Z} - \bar{Z}_I = \Delta K_Q - \frac{2J_A A \omega^2}{r_I \rho n^2 D^4} = \Delta K_Q - \frac{\pi^2}{2} \bar{J}_A \frac{\rho_b}{\rho} A, \quad (6)$$

where ρ and ρ_b – water density and density of blade material consequently.

Let us suggest that geometry of PSBC is designed in such a way that compensation of transverse force is full. Such evaluation t in decreasing hydrodynamics moment which is needed to steering thruster with PSBC when it is used as

steering device. In this case the geometry of PSBC must be chosen with condition $\bar{Z}_z = 0$, see (6)

$$\bar{J}_A = \frac{2\Delta K_Q \rho}{\pi^2 \rho_b A}, \quad (7)$$

where ΔK_Q – amplitude of quantity of moment coefficient, defined from one rotation at the defined oblique flow.

Let us assess the efficiency of PSBC using comparative calculation of hydrodynamic forces acting on steering thruster equipped on trawler project 13010 [7, 8]* as an example.

The principle dimensions and coefficients of theoretical ship drawing are as follows:

- length between perpendiculars $L_{pp} = 46.2$ m;
- breadth $B = 11.2$ m;
- draft $T = 4.8$ m;
- displacement $\nabla = 1593$ m³
- block coefficient $C_B = 0.61$;
- middle section coefficient $C_m = 0.929$;
- propeller diameter $D = 2.8$ m.

For calculation KaMeWa steering thruster make has been chosen, size 24, fig. 5.

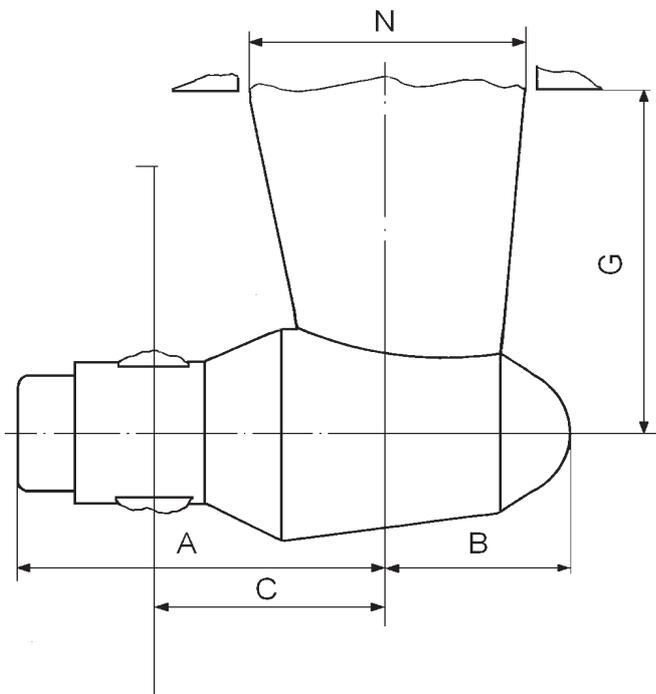


Fig. 5. General view and size KaMeWa steering thruster ($N=1310$ mm, $G=1755$ mm, $B=880$ mm, $C=1100$ mm, $A=1755$ mm)

The effecting of hydrodynamics forces on column with pushing and pulling propellers is different. For the range of angles of rotating column $\delta = 0 \pm 35^\circ$, being typical for traditional rudders, the schemes of forces will be similar to those shown in fig. 6 for $\delta = 16^\circ$. The transverse force, arising on the pushing type of with fixed blades, tends to decrease the rudder angle and creates the moment relative to rudder stock being opposite to hydrodynamics moment arising from the force which is effecting the column's body, fig. 6a. As for the pulling type: the transverse force of propeller tends to increase rudder angle and creates a moment similar to that arising from the force effecting the column's body, fig. 6b.

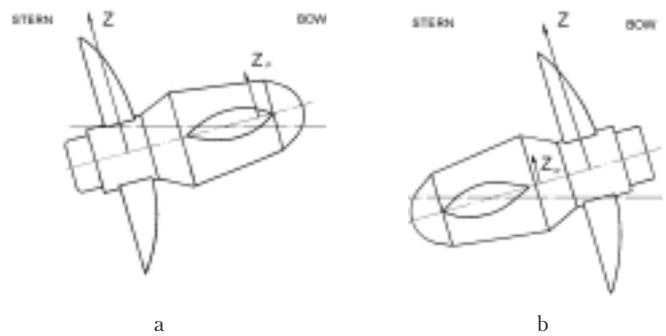


Fig. 6. Scheme of hydrodynamics forces effecting the rotating column, pushing type (a) and pulling type (b), Z – transverse propeller force, Z_p – force effecting the body

For the evaluation of transverse force effecting a propeller with non-moving blades (it may be both a controllable pitch propeller or a fixed pitch propeller as well or control pitch propeller (CPP)) operating in oblique flow the results of model tests shown in fig. 3,4 have been used. At the mode of trawling ($V_s = 6$ knots) the taken pitch ratio P/D of CPP of project 13010 corresponds P/D of model which was tested in oblique flow, see fig. 3,4. The transverse force of the propeller of the mode being considered ($\delta = 16^\circ$, $n = 153$ min⁻¹, $V_s = 6$ knots) was 29% of propeller pulling while a ship is running forward.

The calculation made for the column with a pulling propeller at trawling at $\delta=16^\circ$ showed that the moment relative to rudder angle due to hydrodynamics force acting on body column is only 10% due to the moment of transverse force acting on propeller (the calculation was based on the rudders data [9]). For the steering thruster with a pulling propeller the similar evaluation was not made however it is apparent that the prevailing force that creates the moment on the rudder axis is represented by the propeller's transverse force. Thus removing or decreasing of the propeller's transverse force by using PSBC results in considerable minimization of efforts used to rotate the steering thruster in a wide range $\delta = 0 \pm 35^\circ$ i.e. in ordinary condition of ship steering. This conclusion is correct when contra rotating propellers are used as well.

The most unfavorable conditions of propeller operation are stop crushed modes and reversing of ship. During reversing of ship by using rotating of steering thruster for 180° at first propeller operates in highly oblique flow, further (at $\delta \approx 90^\circ$) practically without axial velocity, i.e. at close to stopping mode and, at last, before ship stopping – at the mode of reverse flow (propeller hydrodynamics characteristics corresponds to second quadrant [10], fig. 7).

Design features of steering thruster restrict parameters which characterize the mode of reversing which results in the use of such loads that are applicable from the point of reliability and strength. As a rule it is expressed in the restrictions of speed of steering thruster rotation and speed of propeller rotation (to decrease power delivered to the screw propeller). The research studies performed by the authors (Vishnevsky L.I. and Togunjac A.R.) in the cavitation tunnel of the Krylov Shipbuilding Research Institute in 1987 showed that at the mode of reverse flow maximum hydrodynamics loads had been observed at the blade frequency, fig. 8a

* The development of project 13010 trawler has been ceased at the technical stage, however the results of detailed model tests being carried out in Krylov Ship Research Institute tank make it possible to use them as the data of project 13010 for the efficiency evaluation of new technical solutions and in particular in using the PSBC. The principal variant of 13010 suggested the use of ducted CPP.

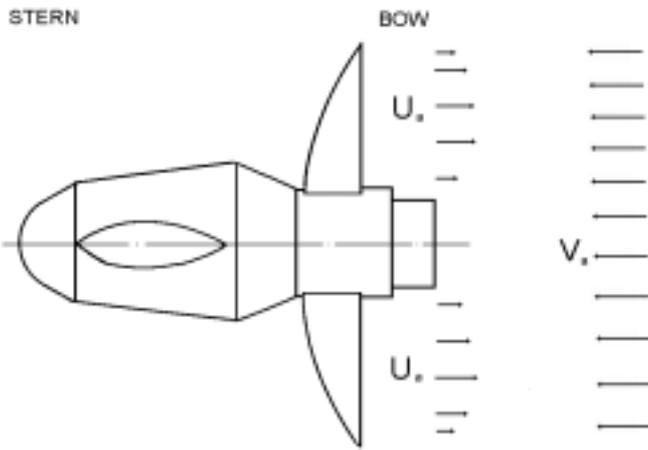
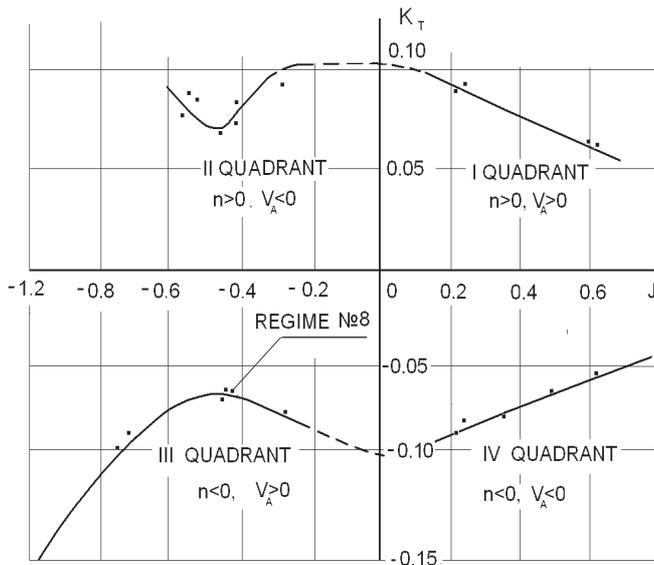
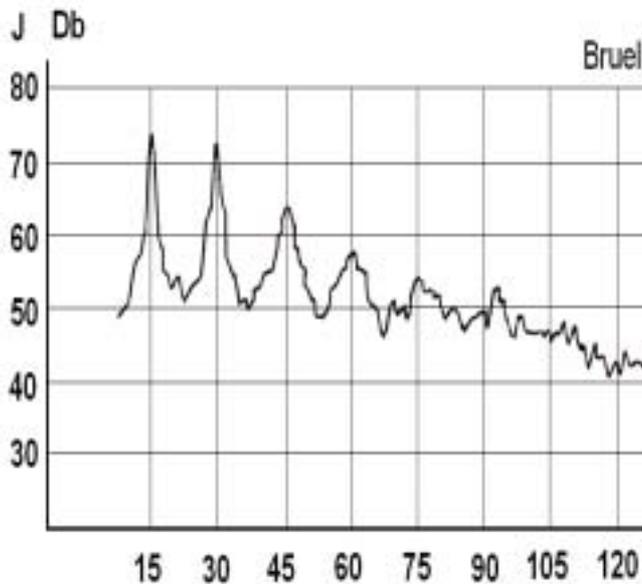


Fig.7. Mode of reversing flow



a



b

Fig.8. Model tests of propeller blade hydrodynamic load in reverse flow mode:

a – curve of action K_T – J blades in four quadrants;
b – spectrogram of blade thrust, III quadrant,
 $n = -15$ 1/c, $J = -0.414$ (mode No 8)

So it may be concluded that the described above mechanism of decreasing variable hydrodynamic forces acting on steering thruster due to the use of PSBC will operate successfully in the mode of reverse flow as well, and the above mentioned restrictions both on the speed of column rotation and speed of propeller rotation will be partially or fully removed.

Decreasing of time of steering thruster rotating for 180° at crush stopping and removing or minimizing of restrictions on power delivered to the propeller will result in shorter way of ship stopping and time of its full stop and, consequently, in the safety of navigation.

4. CONCLUSION

According to the results obtained with PSBCs mounted on steering thruster it is possible to conclude:

- equipping a steering thruster with PSBC will considerably minimize efforts for its rotation within the range of turning (for the pushing type for more than two times);
- applying PSBC is an alternative to CPP, which is very important for contra rotating propellers;
- use of PSBCs for steering thruster is perspective from the point of improving the reversing characteristics of ship i.e.: decreasing of the stopping way and saving time necessary to stop a ship.

The last statement needs to be supported by further research studies. ■

REFERENCES

1. *Vishnevsky L.I.* Propellers With Free Blade Connections // Problems of Ship Hydrodynamics, Krylov Shipbuilding Research Institute, 1994.
2. *Vishnevsky L.I., Togunjac A.R.* Comparative Cavitation Characteristics of Variable Pitch Propeller and Fixed Pitch Propellers Operated in Non – Uniform Flow. – Third International Conference” Navy and Shipbuilding Nowadays”, NSN 2003, Saint-Petersburg, Russia, 2003.
3. *Вишневецкий Л.И., Тогуняц А.Р.* Судовой движитель: Патент на изобретение № 2191136 // Официальный бюлль. «Изобретения». – 2002. – № 29. (20.10). – ВНИИПИ.
4. *Vishnevsky L.I., Krasavtsev V.E., Togunjac A.R.* Some Aspects of Hydrodynamics of Contra – Rotating Propellers With shifted Blade Connection on the Hub. – 15 th International Scientific and Professional Congress “Theory Practice of Shipbuilding” SORTA 2002, Trogir, Croatia, 2002.
5. *Marshall Don S.* Variable Pitch Marine Propeller. United States Patent № 4, 297, 079.
6. *Вишневецкий Л.И., Оглоблин Ю.Ф., Тогуняц А.Р., Шляхтенко А.В., Форст А.А.* Судовая движительная установка типа «поворотная колонка». Патент на изобрет. № 2248302. – Бюлль. «Изобретения». – 2005 (20.03). – № 8. – ВНИИПИ.
7. *Togunjac A.R., Kaprancev S.V.* Projektiranje i modelsko ispitivanje djelotvornosti kontravijjka // Brodogradnja 42. – 1994. – 2. – P.127-133.
8. *Togunjac A.R.* New Designs of Propulsions for Fishing Vessels. Teorija i praksa – Brodogradnje, SORTA-1996, Zagreb, Croatia, 1996.
9. *Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Тутов И.А.* Справочник по теории корабля. – Л.: Судостроение, 1973, с. 447.
10. *Войткунский Я.И.* Справочник по теории корабля. – Т.1. – Л.: Судостроение, 1985, с. 721-723. ■

Проблема транспортного обслуживания пунктов с необорудованным берегом, значительная часть которых расположена на побережье арктических морей, продолжает оставаться актуальной на протяжении десятилетий.

Арктические перевозки России осуществляют морской флот, речные суда, суда смешанного плавания, железнодорожный, автомобильный и воздушный транспорт. Учитывая географическое островное положение ряда пунктов снабжения и расположение других на побережье северных морей, их природно-климатические условия и объемы перевозимых грузов, морские перевозки часто являются единственно возможным либо преимущественным вариантом доставки снабженческих грузов.

Арктические морские перевозки включают: трансарктические, транспортировку полезных ископаемых и леса, доставку грузов снабжения.

Потоки грузов снабжения можно условно разделить на две группы:

- мелкопартионные перевозки, величина которых остается стабильной в течение многих лет (перевозки в большинстве арктических пунктов);

- перевозки, связанные с геологоразведочными работами и освоением месторождений полезных ископаемых, для которых объем грузопотоков достигает сотен тысяч тонн.

В данной статье рассматривается проблема первого рода.

По данным ЦНИИМФ, количество пунктов с необорудованным берегом России – порядка 100, для них характерен устойчивый грузопоток с устойчивой структурой; пункты расположены в сложных климатических условиях.

Рассматривая пути совершенствования доставки грузов снабжения в пункты с необорудованным берегом (ПНБ) можно выделить два направления:

- создание новых типов судов-снабженцев и перегрузочных средств, т.е. усовершенствование существующей линейной системы доставки грузов (рис.1);

- организация магистрально-фидерной системы завоза грузов, включая доставку грузов транспортными судами в базовые северные пункты (магистральная подсистема), и развоз грузов фидерными снабженцами из базовых портов в ПНБ, по районам тяготения (фидерная подсистема).

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА ФИДЕРНОГО ФЛОТА СНАБЖЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ПУНКТОВ С НЕОБОРУДОВАННЫМ БЕРЕГОМ

Г.Ф. Демешко, д-р техн. наук, проф.,
В.И. Могилевский, инж., СПбГМТУ

Магистрально-фидерная система подразумевает:

- исключение рейдовой перевалки грузов;
- сокращение потребности в судах транспортного флота;
- пополнение флота судов фидерных снабженцев, приспособленных к разгрузке в условиях необорудованного берега;
- возможные капиталовложения в береговые сооружения.

На рис.1. представлены две схемы доставки грузов в ПНБ.

Предметом рассмотрения и оптимизации является фидерная подсистема магистрально-фидерной транспортно-технологической схемы.

Вербальное описание постановки задачи. Предполагается следующее:

- базовые пункты на Севере существуют;
- ПНБ разделены на группы так, что в каждую группу грузы доставляются из соответствующего базового пункта;
- объемы перевозок определены;
- грузы снабжения включают: генеральные, овощи и фрукты, ГСМ, уголь;
- в каждый пункт требуется доставлять все четыре вида груза;
- имеется поток обратных грузов из ПНБ в базовые пункты;
- ПНБ различаются требуемым количеством грузов;
- ПНБ расположены в различных географических условиях;

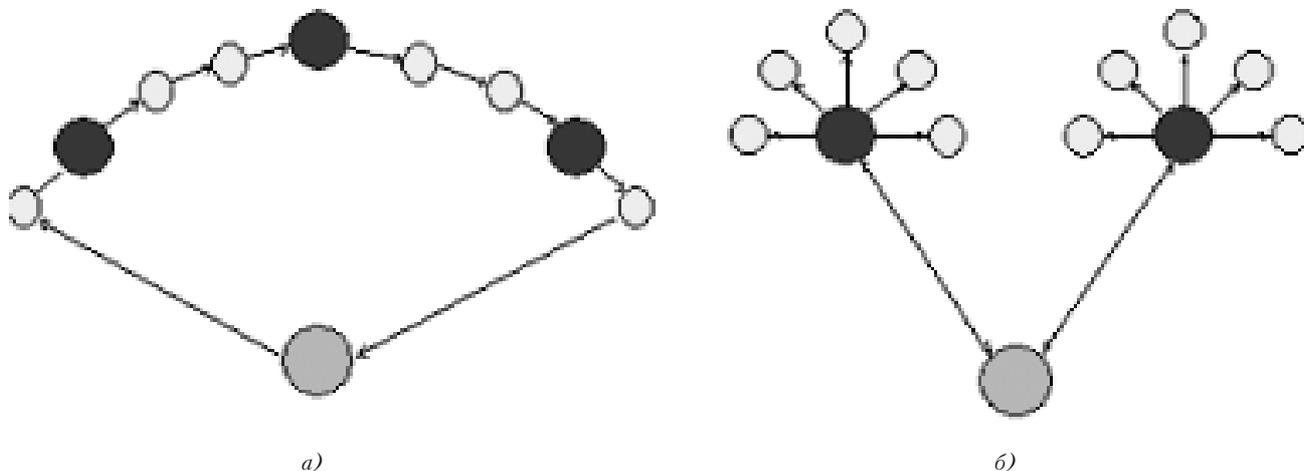


Рис.1. Графы линейной (а) и магистрально-фидерной (б) схем доставки грузов в пункты с необорудованным берегом.

– количество судов в серии влияет на строительную стоимость судна;

– капиталовложения в создание комплекса ограничены.

Рассматриваются следующие типы транспортных средств – фидерных снабженцев: водоизмещающие суда; суда на воздушной подушке; вертолеты.

Принимаются во внимание береговые сооружения обеспечения флота: причалы, береговые площадки для СВП и водоизмещающих судов с носовой аппарелью, ремонтные базы.

Предполагается, что состав флота определяет необходимые береговые сооружения в каждом пункте; суда могут доиспользоваться, и линии доиспользования заданы.

Предстоит проектирование максимально-эффективного комплекса транспортных средств доставки грузов из базовых пунктов в ПНБ. Задача относится к классу задач внешнего проектирования [1].

Модель функционирования. Особенностью постановки задачи является то, что схема функционирования флота до начала решения задачи оптимизации не задана, а строится алгоритмически в ходе выполнения задачи и отражает процесс работы флота за принятый на практике временной интервал, т.е. за навигацию или год. Схема функционирования флота складывается из схем функционирования отдельных судов, его составляющих. Основанием для данного подхода к решению явилась работа [2], выполненная в 1971 г. в ЛГУ, в которой решалась классическая транспортная задача, однако в целочисленной постановке, и одним из важнейших результатов было то, что модель задачи позволяла получить реальную оптимальную систему допустимых маршрутов транспортных средств. Этот же подход и предлагается применительно в данном случае.

Схема функционирования судна определяется как набор линий, объединенных в допустимый маршрут судна наиболее эффективным образом, либо как набор пунктов перевозок в порядке обхода их судном.

Понятие маршрута служит для определения схемы работы судна, моделирования транспортного процесса, и в зависимости от принятого алгоритма построения схемы функционирования может вводиться двумя способами:

– *маршрут H судна s* есть упорядоченный набор линий, на которых судно работало в течение эксплуатационного периода с учетом линии перехода к пункту отстоя и ремонта.

$$H = (S, u_{ip}, u_{jp}, \dots, u_{ni}).$$

– *маршрут H судна s* есть упорядоченный набор из номера транспортного средства и номеров пунктов перевозок в порядке обхода их судном в течение эксплуатационного периода, а также пункта постановки судна на ремонт и отстой:

$$H = (S, i_p, j_n, \dots, i_m, i_n).$$

Допустимыми считаются маршруты, для которых выполнены следующие ограничения:

– тип судна совместим со всеми пунктами маршрута, а также

– со всеми видами грузов, перевозимых на маршруте;

– для каждого пункта время посещения судном пункта находится в пределах времени, когда навигация в пункте для данного судна открыта.

Для заданного множества судов, составляющих флот, набор наиболее эффективных допустимых маршрутов представляет рациональную схему функционирования флота.

Таким образом, для формирования схемы функционирования флота необходимо построение множества всех допустимых маршрутов судов, входящих в состав флота, и выделение из этого множества подмножества оптимальных маршрутов.

Определим переменные X_H (количество судов на маршруте), которые обеспечивают максимум целевой функции

F , где F – чистый ежегодный доход по комплексу транспортных средств, при выполнении следующих условий:

– заданных объемов перевозок по каждому базовому и НБП;

– ограничений капиталовложений;

– ограничений по количеству судов уже построенных, дальнейшее производство которых не осуществляется, здесь X_H – целое неотрицательное число.

Решение задачи. Рассматриваемая задача относится к классу задач целочисленного программирования. Поиск целочисленного решения осуществляется поэтапно, параллельно построению системы допустимых маршрутов, при этом решения на более поздних этапах детализируют и дополняют уже имеющееся частичное решение. Используются элементы линейного программирования. Для построения маршрутов судов применяется процедура динамического программирования.

На первом этапе маршруты судов предполагаются маятниковыми, что соответствует работе судна в течение эксплуатационного периода на одной линии. Решается задача оптимизации в нецелочисленной постановке. В результате решения задачи первого этапа получается система оптимальных маршрутов, которая фиксируется; маршрутам приписываются только целые количества судов, а также объемы перевозок, выполненные этими судами. Если хотя бы одному маршруту соответствует нецелое количество транспортных средств, то в результате решения задачи данного этапа остаются невыполненные перевозки. С этим объемом перевозок должна решаться задача второго этапа.

На втором этапе решения задачи маршруты судов представляются как наборы линий; при этом предполагается, что судно в процессе эксплуатационного периода последовательно обслуживает несколько линий, а линии объединяются в маршруты наиболее целесообразным способом. Решается нецелочисленная задача оптимизации. Маршруты для включения в базис строятся с помощью процедуры динамического программирования. В результате строится система оптимальных маршрутов, которая фиксируется; маршрутам приписываются только целые количества судов, а также объемы перевозок, выполненные этими судами. Данная система, с целым количеством транспортных средств, включается в оптимальный план целочисленной задачи путем добавления к системе маршрутов с целым количеством судов первого этапа. Если хотя бы на одном маршруте количество судов нецелое, то после второго этапа остаются невыполненные перевозки. С этими объемами перевозок должна решаться задача третьего этапа. Схема алгоритма задачи второго этапа показана на рис.2.

На третьем этапе маршрут судна представляется как набор пунктов, которые судно обходит в течение эксплуатационного периода наиболее целесообразным образом. Решается целочисленная задача с оставшимися от первых двух этапов объемами перевозок. Вычисления производятся следующим образом. По процедуре динамического программирования находится маршрут с наивысшей оценкой. Затем выполненные на маршруте перевозки исключаются из дальнейшего рассмотрения, и строится следующий маршрут. Процесс продолжается до тех пор, пока все заданные объемы перевозок не будут выполнены. В результате решения задачи третьего этапа получается система оптимальных маршрутов с целым количеством судов на них, которая включается в решение поставленной целочисленной задачи.

Качество метода может быть проверено путем сравнения с решением задачи поставленной как нецелочисленная гладкая и линейная.

ВЫВОДЫ

В результате решения задачи оптимизации флота с использованием вышеописанного подхода строится оптималь-

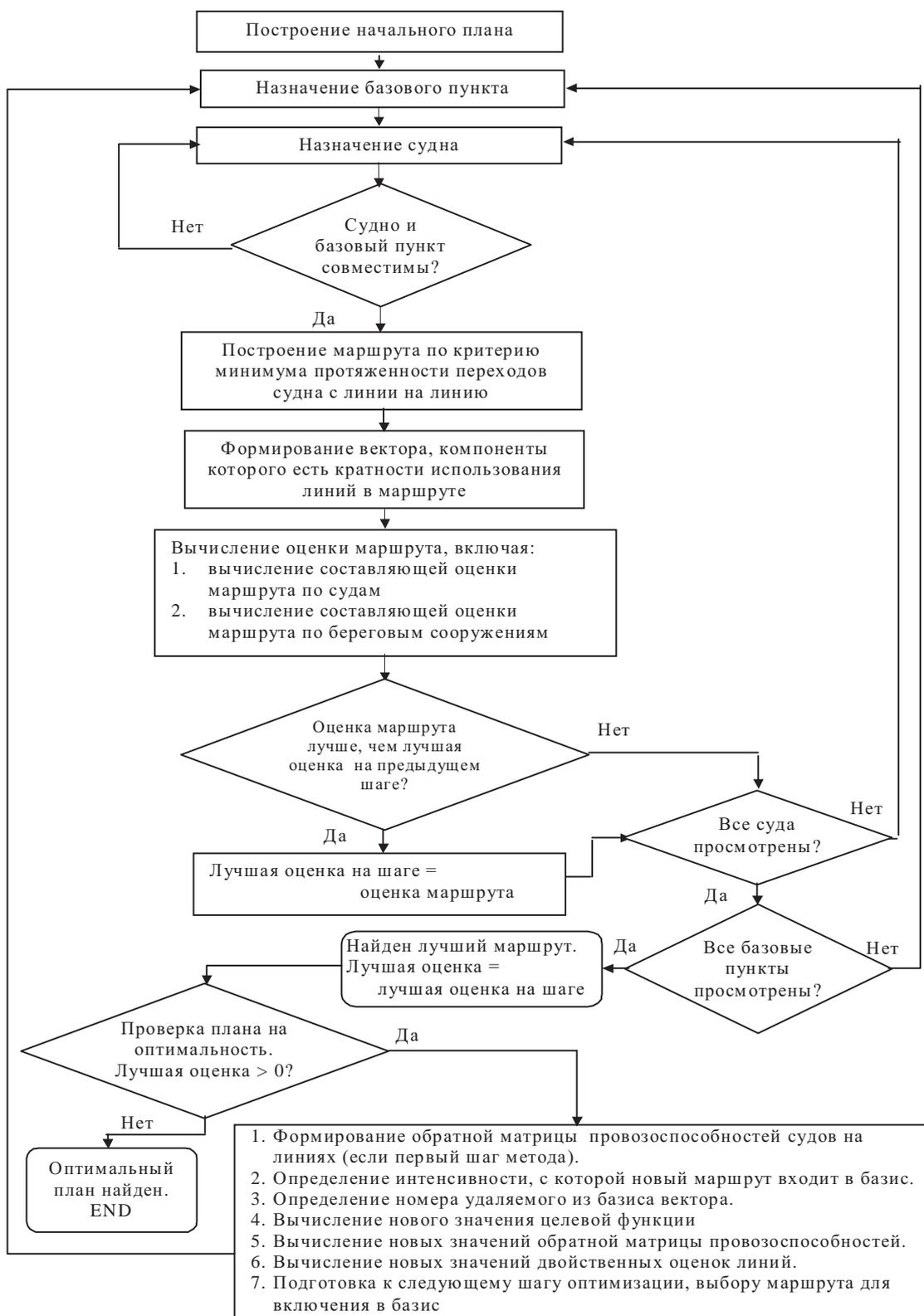


Рис.2. Схема алгоритма оптимизации с алгоритмическим формированием маршрутов судов как наборов линий перевозок

ный план, определяющий состав флота и схему его функционирования, как набор маршрутов судов. Количество судов на маршрутах – целое.

Предлагаемый целочисленный подход с формированием схемы работы флота делает результаты решения задачи более наглядными, а также улучшает качество решения для случая, когда количество судов невелико, что характерно для рассматриваемого флота снабжения арктических пунктов с необорудованным берегом. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Пашин В.М. Оптимизация судов. – Л.: Судостроение, 1983.
2. Аникеич А.А., Бобарыкин В.А., Грибов А.Б. Автоматизация ежедневного планирования работы грузовых автомобилей. – М.: Транспорт, 1971. ■

Рецензент: Б.А. Царев, д-р техн. наук, проф.

В современной практике исследовательского проектирования судов главное внимание обращается на обоснование оптимальных значений проектных характеристик. Надежность оптимизационных разработок в наибольшей степени зависит от полноты логико-аналитических моделей, на базе которых ведутся проектные исследования. Если сравнить характер исследовательского проектирования в нашей стране сейчас и лет двадцать назад, то необходимо отметить несколько особенностей:

1) проектная практика более тесно связана с применением опыта зарубежных фирм (вплоть до использования импортных систем автоматизированного проектирования по наиболее распространенным типам судов), однако остается актуальной необходимость параллельных исследований и программно-компьютерных разработок, чтобы не отстать от мирового уровня и не попасть в чрезмерную зависимость от иностранцев;

2) непосредственно для отечественного рынка более типичными стали разработки относительно небольших по размерениям судов; на первый взгляд, для таких судов модели проще, но фактически именно таким судам в теории проектирования раньше уделялось недостаточно внимания, и некоторые вопросы для них приходится исследовать заново;

3) наши исследовательские и проектные организации заинтересованы в привлечении иностранных заказчиков, поэтому спектр типов судов для перспективных исследований должен быть гораздо шире, чем раньше; в такой ситуации эффективными должны быть модульные подходы.

Многообразие типов судов и других объектов морской техники приводит к необходимости формирования множества оптимизационных моделей для проектного обоснования принимаемых решений [1, 3]. Эти системные модели содержат ряд повторяющихся программных модулей, применение которых вновь тем удобнее, чем более четко проведено подразделение моделей на алгоритмические подсистемы.

Под алгоритмическими подсистемами подразумеваются уравнения, неравенства и другие логико-аналитические описания взаимосвязей характеристик и свойств судов, представленные не только в виде формул, но также в графическом, табличном, описательном и программно-формируемом виде. Таким образом, часто применяемое в теории проектирования судов понятие «уравнения» (распространяемого обычно и на неравенства) обобщается в данной статье и обозначается термином «алгоритмическая подсистема».

ФОРМИРОВАНИЕ ГИБКИХ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВ

Б.А. Царев,
д-р техн. наук, проф., СПбГМТУ

По мере наработки базы данных по алгоритмическим подсистемам появляется возможность при разработке новых оптимизационных моделей для оригинального типа судна использовать концепцию гибкой алгоритмической модели (ГАМ). Обычно от алгоритмической модели на следующем шаге предусматривается переход к созданию комплексов программного обеспечения вплоть до формирования подсистем и систем автоматизированного проектирования. Поэтому в соответствие ГАМ может быть поставлена гибкая программная система или подсистема, собираемая из программных модулей или подмодулей в структурном подобии с ГАМ.

Формирование ГАМ из имеющегося набора алгоритмических подсистем (при дополнении двумя-тремя вновь разрабатываемыми подсистемами) должно производиться на основе ранжирования по принципу функционального доминирования подсистем и (или) признаков оптимизируемого судна. Такой же фактор доминирования определяет состав и последовательность вновь разрабатываемых алгоритмических подсистем.

С позиций функционального доминирования логично выделение трех системных моделей проектного анализа судна: эксплуатационной, построечной и проектно-концептуальной, состоящих соответственно из функциональных, конструктивно-технологических и алгоритмических подсистем [5]. Указанные подсистемы взаимосвязаны, но имеющиеся аналоги в каждой из трех моделей формируются не только из одноименных модулей, но и включают в себя в одной из моделей такие модули, которые не принадлежат к одноименным подсистемам в

другой модели. Сами модели в совокупности образуют трехкомпонентную комплексную логико-аналитическую модель оптимизации проектируемого и строящегося судна. Особенности такой супермодели зависят от типа функционального доминирования и от его влияния на существенные алгоритмические подсистемы.

Важно отметить, что кораблестроительные системы и их модели являются эргатическими, т.е. в них с техническими компонентами тесно переплетены люди в качестве управляющих элементов подсистем. В эксплуатационной системной модели эргатичность выражена наиболее явно. Для грузовых судов в экипаже четко выделены подсистемы «палубная команда» и «машинная команда». На военных кораблях роль подсистем играют боевые части – штурманская, ракетно-артиллерийская, минно-торпедная, машинная и т.д. В построечной модели эргатичность весьма своеобразная: люди из экипажа в ней отсутствуют, но в качестве временного эргатического компонента при создании каждой сборочно-монтажной единицы типа узла, секции, блока участниками процесса являются конкретные инженеры и рабочие с соответствующим технологическим оборудованием. Наконец, в проектировочном процессе почти в каждой алгоритмической подсистеме в качестве виртуальных элементов предполагается участие конкретных членов экипажа, а сам процесс проектирования и оптимальность его результатов, конечно же, зависят от людей – проектантов. Особенно ярким примером проявления роли членов экипажа является для парусных яхт легкого типа алгоритмическая подсистема «Остойчивость». В ее концепции предусмот-

рено и непосредственное участие экипажа в обеспечении остойчивости в виде откренивания, и принятие мер по уменьшению площади парусов («взятию рифов») при угрозе усиления силы и скорости ветра.

По степени проявления функционального доминирования в типизационных случаях наиболее характерными являются следующие доминирующие на конкретном судне подсистемы, объекты и их модификации:

1) *корпус судна* (обычный, усиленный, видоизмененный, многокомпонентный);

2) *подсистема основного функционирования* – специализированный комплекс (жилой, промышленный, приборно-лабораторный, подъемно-тяговый, энергетический, производственный);

3) *гидродинамическая система* (подъемно-несущая, маневренная, аэродинамической тяги);

4) *человек* в качестве ведущего звена эргатической системы (управляющего, регулирующего, энергосилового, стабилизирующего либо сочетающего выполнение таких функций).

Первое место признается за корпусом в связи с тем, что его роль многообразнее любой другой подсистемы. Во-первых, корпус является системообразующей структурной основой, к которой функционально и конструктивно присоединяются все другие подсистемы. Во-вторых, корпус является вместилищем грузов при наиболее типичном транспортном назначении судов (при этом главными переборками производится подразделение на основные отсеки). В-третьих, конструкции корпуса обеспечивают прочность, воспринимая внешние давления, силы и моменты. В-четвертых, форма поверхности корпуса влияет на ходовые и мореходные качества. Для большинства судов несомненно также важна (иногда и доминирующая) роль энергетической подсистемы, которая в перечне учитывается второй позицией.

Более конкретно варианты проявления функционального доминирования рассмотрены в табл.1.

С учетом как рассмотренных типизационных признаков функционального доминирования, так и особенностей применения можно выделить более 40 групп или подгрупп судов и методов их проектного анализа и оптимизации. Такая дифференциация не всегда совпадает с группировкой по табл.1. Она предусматривает, в частности, следующие позиции:

а) обеспечение грузопотоков (танкеры, сухогрузные суда, газовозы, снабженцы);

б) поддержание пассажиропотоков и коммуникаций (пассажирские суда, круизные суда, паромы; военные корабли);

в) операционное обеспечение (спасатели, экспедиционные и учебные суда, суда для миротворческих операций и для охраны экономических зон, плавбазы, рефрижераторные суда, доки, плавучие гостиницы и причалы);

г) тягово-технологическое обеспечение (буксиры, ледоколы, земснаряды, буровые установки, плавкраны, плавэлектростанции, промысловые суда);

д) достижение высоких скоростей (рекордно-гоночные катера, экспериментальные катера, буксировщики, разбездные катера, патрульные суда);

е) использование для спорта и отдыха (туристские катера, моторные и парусные яхты, виндсерферы, гребные суда).

Рассмотрение данного перечня приводит к пониманию того, что обычный корпус как субъект функционального доминирования соответствует лишь задачам обеспечения грузопотоков. В остальных же случаях корпус, функционально доминируя, кардинально видоизменяется либо уступает свою первенствующую роль другим подсистемам судна.

Анализ особенностей и субъектов функционального доминирования необходим в качестве средства ранжирования алгоритмических подсистем при построении рациональных схем оптимизационных ГАМ. Свойство гибкости обеспечивается главным образом за счет модульного подразделения алгоритмических подсистем, а также за счет выбора рациональных форм общих и локальных целевых функций (критериев оптимизации) [4, 5]. Это позволяет универсальные программные модули и подмодули переносить из данной ГАМ в другую, а в ряде случаев многократно использовать и специализированные модули, соответствующие однородным субъектам функционального доминирования.

Например, для высокоскоростного судна-спасателя при доминировании несущей системы и при приоритете обеспечения и анализа подсистем «Ходкость» (4) и «Мореходность» (28) с этими алгоритмическими подсистемами будут тесно связаны алгоритмические подсистемы «Остойчивость поперечная» (10), «Вертикальная динамичность» (33), «Непотопляемость» (11), «Прочность» (12), «Управляемость и маневренность» (15), «Устойчивость движения в продольной вертикальной плоскости» (34). Здесь и далее каждой алгоритмической подсистеме присвоен постоянный порядковый номер, сложившийся относительно стихийно (по анализу практики проектирования судов 10–15 наиболее распространенных типов).

Значительная часть модулей упомянутых алгоритмических подсистем

может быть в несущественно измененном виде использована в ГАМ разбездных или пассажирских катеров. При этом близость ранжирующих условий предопределяет во всех этих ГАМ тяготение перечисленных алгоритмических подсистем к началу структурных блок-схем, сразу вслед за алгоритмическими подсистемами «Функциональная обоснованность» (1) и «Практическая реализуемость» (2) (лидирующими в ГАМ любых судов). Можно сказать, что совокупность подсистем, перечисленных в предыдущем абзаце, составляет (за исключением подсистемы «Непотопляемость») алгоритмическую суперподсистему «Обеспечение динамического режима движения». Аналогичный пример комплексирования можно привести, вспомнив о суперподсистеме «Навигационная безопасность», которая включает в себя целиком алгоритмические подсистемы «Надежность» (14), «Остойчивость поперечная», «Непотопляемость», «Прочность», «Безопасность труда экипажа» (35), а также существенно важные модули из подсистем «Удифференцированность, продольная остойчивость и балластировка» (9), «Мореходность» (28), «Управляемость и маневренность», «Функциональная обоснованность», «Технологичность» (7) и «Обитаемость» (18) [6].

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в рассмотрении данной аналогии суперподсистем часть алгоритмических подсистем являются общими («Остойчивость», «Прочность», «Мореходность», «Управляемость и маневренность»). Это само по себе иллюстрирует схему формирования ГАМ из подмоделей. Существенно то, что в разных ГАМ, их подмоделах, суперподсистемах реальные порядковые места одних и тех же алгоритмических подсистем и их модулей будут разными, хотя и близкими. Для контроля всей системы целесообразно каждую алгоритмическую подсистему числить под постоянным номером, допуская требуемый «беспорядок» в конкретных ГАМ и (или) суперподсистемах.

При формировании и ранжировании алгоритмических подсистем могут быть учтены рекомендации А.В. Бронникова, давшего типизацию некоторых проектировочных моделей и алгоритмических подсистем применительно к судам-газовозам [2].

Принцип переменного ранжирования алгоритмических подсистем во взаимосвязи с назначением и конструктивно – гидродинамическими характеристиками судна можно рассмотреть в сопоставлении с моделью проектного анализа полуглиссирующего пассажирского катера. В этом случае ранее упоминавшиеся подсистемы сохраняют свои номера, а дополнитель-

Группировка судов по вариантам. Проявления доминантности подсистем

№	Доминирующая подсистема	Соотношение роли доминанты с ролью корпуса	Акцентирующие подсистемы	Суда и корабли – представители
1	Корпус	Совпадает	Грузовые помещения и устройства	Паромы Грузовые суда
2	Сильно измененный корпус или корпуса	Расширяются функции корпуса	Энергетика или подсистемы основного назначения	Ледоколы Глиссеры Катамараны Скеговые суда на воздушной подушке Суда с малой площадью ватерлинии Буровые установка
3	Подсистема основного назначения	Превышает, но незначительно	Энергетика или подсистемы живучести и автономности	Пассажирские суда Буксиры Надводные корабли Спасатели Промысловые суда Научные суда
4	Несущая подсистема	Превышает	Подсистема управления и энергетика	Суда на подводных крыльях Амфибийные суда на воздушной подушке
5	Подсистема изменения положения по вертикали	Сопоставимы	Подсистема управления и стабилизации	Экранопланы Подводные суда и аппараты Доки
6	Подсистема аэродинамической тяги	Сопоставимы	Подсистемы живучести и автономности	Парусные суда Килевые яхты Суда с новыми видами ветроустройств
7	Человек	Превышает	Подсистема безопасности	Гребные суда Швертботы Виндсерферы Рекордные катера

но будут учтены следующие алгоритмические подсистемы:

3. «Пассажировместимость»; 5. «Рациональная структура нагрузки»; 6. «Плаваемость»; 8. «Экономичность»; 13. «Обеспечение плавности качки»; 16. «Пожаробезопасность»; 17. «Оборудованность»; 19. «Экологичность»; 20. «Эстетичность архитектурных форм»; 21. «Компоновочная рациональность»; 22. «Комфортабельность»; 23. «Незаливаемость и всхожесть на волну»; 24. «Рациональность форм обводов»; 25. «Энергосберегаемость»; 26. «Минимальная ресурсоемкость по ценным металлам»; 27. «Вибростойкость»; 29. «Конструктивная реализуемость»; 30. «Построечная реализуемость»; 31. «Минимальная энергонасыщенность»; 32. «Рациональное соотношение спасательных возможностей с населенностью».

При этом наиболее существенные проектные вопросы будут с достаточ-

ной полнотой выяснены в пределах позиций с 1 по 13, а позиции с 14 до 35 будут затрагиваться в умеренной степени. Можно рассматривать алгоритмические подсистемы как совокупность достаточно универсализированных базисных модулей, а также модулей, учитывающих специфику пассажирского полуглиссера. Значит, в других ГАМ можно применить значительную часть из упомянутого, но в иных композициях и с добавлением нового, учитывающего особенности нового объекта оптимизации.

Применительно к ГАМ танкера, например, вполне работоспособная последовательность алгоритмических подсистем ограничится четырнадцатью позициями 1, 2, 5, 6, 8, 9, 3, 7, 12, 16, 17, 19, 4, 15. Следует обратить внимание на смещение к середине и к концу ГАМ позиций 3, 4, 7 («Вместимость», «Ходкость», «Технологичность»), которые для танкера необходимы, но уступают

по приоритету позициям 5, 6, 8 («Нагрузка», «Плаваемость», «Экономичность»), переместившись на более близкие к началу перечня места.

Для экспедиционно-исследовательского судна последовательность подсистем в ГАМ может быть следующей: 1, 2, 6, 17, 5, 9, 12, 13, 3, 18, 4, 20, 15, 10, 11, 8 (всего 16 подсистем).

В модели проектного анализа пассажирского судна на подводных крыльях логичным вариантом ГАМ будет такой перечень подсистем: 1, 2, 33, 4, 5, 8, 28, 3, 21, 12, 9, 10, 13, 34, 15, 7, 6, 11, 14, 16, 27, 17, 22, 18, 24, 29, 30, 31, 26, 19, 23, 25. Здесь последние 10 позиций имеют контрольный характер, и не влияют существенно на величины выбранных ранее основных проектных характеристик. Заметное изменение порядкового места таких подсистем, как 33 («Вертикальная динамичность»), 28 («Комплексная мореходность»), 34 («Продольная устойчивость») связано

с принципиальными особенностями динамики судна, взятого для примера.

В табл.2 рассмотрена избыточная структура предназначенных для ГАМ алгоритмических подсистем с подразделением на 5 групп по характеру рассматриваемых свойств. Избыточность означает, что в одной из ГАМ применение всех 42 алгоритмических подсистем маловероятно (обычно хватает одной трети и даже четверти). Группы с одинаковым видом генеральных свойств индексированы заглавными буквами кириллицы по очередности проектного анализа и отмечены единым положением по вертикали (с одинаковым отступом от левого края таблицы в порядке А, Д, В, Б, Г).

Табл.2 показывает, что в первом приближении алгоритмические подсистемы разделены на пять групп:

- а) по свойствам, связанным с назначением;
- б) по динамическим мореходным качествам;

в) по статическим мореходным качествам;

г) по особым свойствам (проще говоря, по тем, которые не подпадают под другие формулировки);

д) по конструктивно-прочностным свойствам.

Эта разбивка носит необязательный характер. Для малых ГАМ она часто не нужна, а для развернутых ГАМ число выделяемых групп может возрасти. Эти вопросы будут уточняться по мере применения рассмотренного способа проектного анализа.

Изложенный подход формирования проектно-исследовательских алгоритмов и программных комплексов особенно подходит для исследований по вновь возникающим группам судов (например, для судов экологического контроля или судов охраны экономических зон) либо по обособляющимся подгруппам внутри известных групп судов (например, по сверхкрупным контейнеровозам или лайнерам).

В таких ситуациях отсутствие достаточной статистической или прототипной базы приводит к необходимости систематизации опыта по судам смежных типов. В такой схеме концепция формирования ГАМ из алгоритмических подсистем наиболее эффективна.

Возможность ускоренного формирования новых ГАМ на основе старых не просто высвобождает время и сокращает сроки исследований, но и четко ориентирует проектантов на быстро выявляемые недоработанные вопросы и на необходимость проведения по ним дополнительных экспериментов или формирования нормативов. Например, тенденция создания сверхкрупных лайнеров резко обостряет вопрос о риске при авариях и вообще о возможности организации спасательных работ при сверхвысокой концентрации людей, тем более, что к аварийным рискам прибавились риски, связанные с террористами и морскими пиратами. Уже появились проекты базирования на сверхлайнерах патрульных и спасательных вертолетов, следовательно, на наших глазах рождается новый тип лайнера-вертолетоносца. Вообще же, по мнению автора, государственные и классификационные органы должны ограничить допустимую «населенность» объектов морской техники, не превышая лимит 1000–1100 человек (вместе с экипажем и обслуживающим персоналом).

Способ оптимизационного проектирования на основе ГАМ хорошо приспособлен к современной практике применения персональных компьютеров. По мере формирования ГАМ (и в целом проектных методик) для ряда судов последующие задачи будут требовать все меньших новых разработок, однако ранжирование алгоритмических подсистем необходимо периодически корректировать. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Ашик В.В. Проектирование судов. – Л.: Судостроение, 1985.
2. Бронников А.В. Классификация и сопоставительный анализ алгоритмов определения основных элементов проектируемых судов / Тр. ЛКИ: Обоснование характеристик проектируемых судов. – Л., 1984, с. 3 – 8.
3. Пашин В.М. Оптимизация судов. – Л.: Судостроение, 1983.
4. Царев Б.А. Классификация дискретных факторов при оптимизационном проектировании судов / Тр. НКИ: Проектирование и конструкции судов. – Николаев, 1983, с. 8 – 16.
5. Он же. Оптимизационное проектирование скоростных судов. – Л.: Изд. ЛКИ, 1988.
6. Он же. Проектный анализ проблемы навигационной безопасности / Тр. ЛКИ: Проектирование морских судов. – Л., 1988, с. 36 – 41. ■

Алгоритмические подсистемы с группировкой по генеральным свойствам

А.Свойства, связанные с назначением

- А.1.Функциональная обоснованность
- А.2.Практическая реализуемость
- А.3.Вместимость и пассажировместимость

Б.Динамическая мореходность

- Б.4.Ходкость
- А.5.Рациональность структуры нагрузки
- В.Статическая мореходность
- В.6.Плавуучесть и надводный борт
- Г.Особые свойства
- Г.7.Технологичность
- Г.8.Экономичность
- В.9.Удифференцированность, балластировка
- В.10.Остойчивость поперечная
- В.11.Непотопляемость

Д.Конструктивно-прочностные свойства

- Д.12.Прочность
- Б.13.Плавность качки и незаливаемость на волнении
- Д.14.Надежность
- Б.15.Управляемость и маневренность
- Д.16.Безопасность при авариях, в том числе при пожарах
- А.17.Оборудованность (в первую очередь, приборами)
- А.18.Обитаемость по физиологическим параметрам
- Г.19.Экологичность
- Г.20.Архитектурная выразительность
- А.21.Компоновочная рациональность
- А.22.Комфортабельность
- В.23.Незаливаемость и всхожесть на волну
- В.24.Рациональность формы корпуса
- Г.25.Энергосберегаемость
- Г.26.Минимальная ресурсоемкость
- Д.27.Минимальность вибрации и шума
- Б.28.Мореходность комплексная
- Д.29.Конструктивная реализуемость
- А.30.Построечная реализуемость
- А.31.Минимальная энергонасыщенность
- А.32.Рациональное соотношение спасательных возможностей
- Б.33.Вертикальная динамичность
- Б.34.Устойчивость движения на больших скоростях
- А.35.Безопасность труда экипажа
- В.36.Возможность противодействия дрейфу

- Д.37.Ледопроездимость
- Г.38.Вездеходность
- Д.39.Ремонтопригодность

- А.40.Вооруженность
- Г.41.Скрытность от средств обнаружения
- Г.42.Защищенность от поражающих факторов
- Г.43.Десантоспособность

В настоящее время в связи с необходимостью обеспечения круглогодичного вывоза углеводородного сырья из Арктического бассейна к возможным потребителям перед судостроительной отраслью поставлена задача создания транспортных судов активного ледового плавания нового поколения, которые должны работать в арктических условиях как в сопровождении ледокола, так и без него. Ожидается, что освоение уникальных месторождений нефти и газа на арктическом шельфе России, запасы которых составляют около 100 млрд. т в нефтяном эквиваленте, потребует к 2010 г. строительства 12 – 13 морских платформ для добычи углеводородного сырья, 14 ледоколов различного назначения, 34 гидрографических, аварийно-спасательных и природоохранных судна, более 50 транспортных судов активного ледового плавания общим дедевитом около 1 млн. 300 тыс. т.

Создание таких транспортных судов, обеспечивающих круглогодичную навигацию в условиях Арктики, связано с решением целого комплекса сложных научно-технических проблем. Среди них важное место занимает проблема повышенной вибрации при плавании судна во льдах.

В 70 – 80-е г. XX в. специалистами ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова [1, 2], ЦНИИ МФ [3, 4, 5, 16], Арктического и антарктического научно-исследовательского института [6, 7, 8] велись активные работы по натурным исследованиям ходовой вибрации при движении судна во льдах. Благодаря их усилиям был создан банк экспериментальных данных, который хотя и не может считаться достаточным, но позволяет сделать ряд принципиальных выводов о динамическом поведении судов в ледовых условиях.

Вибрационные процессы, имеющие место при движении судна во льдах, строго говоря, нестационарны. Однако, согласно проведенным наблюдениям, в процессе эксплуатации есть довольно продолжительные периоды, в течение которых ледовые условия, с точки зрения гидрологической классификации, остаются практически постоянными или медленно меняющимися, и тогда взаимодействие корпуса со льдом можно считать стационарным случайным процессом.

Усиление вибрации во льдах в зависимости от параметров льда (толщина, сплоченность, торосистость, наличие снежного покрова и т.п.), скорости хода судна и от октавы нормируемого диапазона может достигать 20–22 дБ, т.е. в 20 раз и более по сравнению с уровнями вибрации при движении судна по чистой воде.

Наряду с ростом интенсивности вибрации корпуса судна во льдах сильно меняется и спектральный состав проис-

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ АКТИВНОГО ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

*А.П.Матлах, проф. СПбГМТУ,
генеральный директор НПО «Полярная Звезда»*

ходящих вибрационных процессов. Если при движении судна по чистой воде вибрация корпуса достаточно полно характеризуется колебаниями с частотами лопастного и двойного лопастного порядков, индуцируемыми гребными винтами, а также с частотами 5 – 9-го порядков, индуцируемыми низкооборотным дизелем, то во льдах заметными становятся составляющие с частотами высших лопастных порядков (рис.1).

Кроме того, при движении судна во льдах проявляется так называемая ледовая вибрация, являющаяся следствием импульсного взаимодействия корпуса судна со льдом и проявляющаяся, главным образом, с основными собственными частотами корпуса судна.

Ледовая и импульсная нагрузки возбуждают общую вибрацию корпуса судна в вертикальной, горизонтально-продольной и горизонтально-поперечной плоскостях. В виду больших углов наклона шпангоутов в носовой оконечности судов активного ледового плавания наибольшая величина импульса приложена в вертикальной плоскости и, как следствие этого, преобладает вертикальная компонента вибрации.

Высоты импульсов, их распределение во времени и по длине носовой оконечности зависят от случайных внешних факторов, обусловленных скоростью судна v , толщиной $h_{\text{л}}$ и сплоченностью s льда, высотой снежного покрова $h_{\text{сн}}$. Количество импульсов за единицу времени (плотность импульса λ также определяется сплоченностью льда и скоростью движения судна (рис. 2). Частота следования импульсов зависит от скорости судна. При приближении частоты следования импульсов к собственным частотам колебаний корпуса отмечается существенное возрастание амплитуд колебаний, напоминающих по характеру пики резонансной кривой.

Таким образом, аппроксимируя имеющиеся экспериментальные данные по вибрации судов различных типов, на транспортных судах активного ледового плавания можно ожидать:

- в частотных октавах со среднегеометрическими значениями частот 2 и 4 Гц, в которых уровни вибрации определяются дискретами с частотами низших собственных тонов корпуса и первого порядка от работы гребных винтов, возрастание уровней вибрации во льдах может составить 10 – 15 дБ по сравнению с чистой водой. Причиной такого усиления вибрации является воздействие на носовую часть корпуса аperiodических импульсов, обусловленных ударным взаимодействием корпуса со льдом;
- в октаве 8 Гц, в которой вибрация определяется лопастной гармоникой, уровни виб-

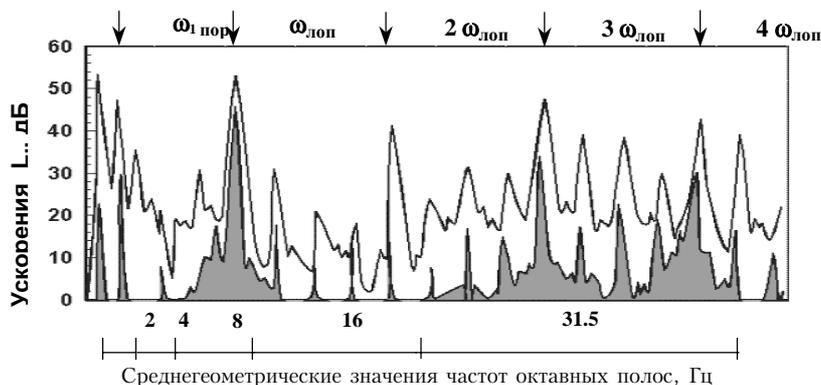


Рис.1. Сравнение уровней ходовой вибрации корпуса ледокола на чистой воде и во льдах (ω — частота первого порядка, $\omega_{\text{лост}}$ — лопастная частота)

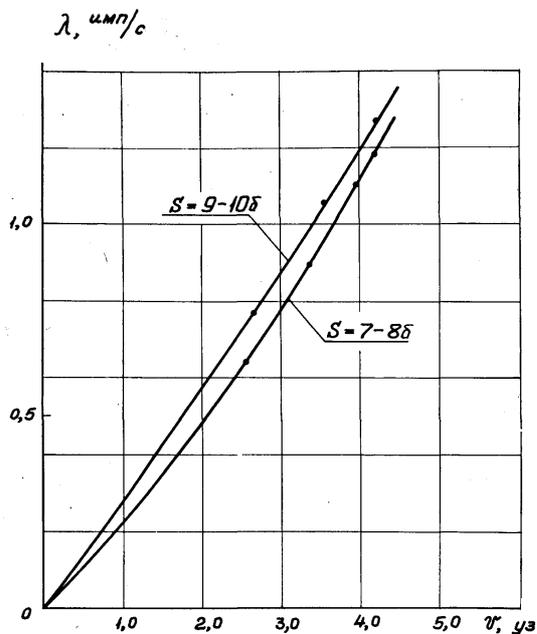


Рис.2. Зависимость числа импульсов λ , получаемых носовой оконечностью д/э «Обь» при движении в мелкобитых льдах.

рации во льдах могут возрастать на 3 – 6 дБ при условии отсутствия в этом частотном диапазоне резонансов корпуса и надстройки судна;

– в более высокочастотных октавах 16 и 31,5 Гц, в которых преобладающими дискретами являются дискреты второго и третьего лопастного порядка, усиление может составить 3 – 4 дБ при отсутствии резонансов основных тонов вертикальных колебаний обитаемых палуб надстроек.

В табл. 1 представлены фактические величины максимального в каждой октаве возрастания ходовой вибрации корпуса и надстройки в зависимости от ледовых условий плавания, замеренные на а/л «Сибирь» [4].

Из данных табл. 1 видно, как различные ледовые условия могут влиять на характер и интенсивность ходовой вибрации судов ледового плавания. Так, например, в тонких

белых, но торосистых льдах, толщиной 60 – 70 см, интенсивность вибрации корпуса и надстройки в октаве 2 Гц заметно – в 2–3 раза выше, чем в более толстом (90–130 см) сплошном ровном поле, и примерно одного порядка в некоторых других октавах (например, 16 и 32 Гц). Представляет интерес также то, что даже при такой незначительной для мощного атомного ледокола толщине льда – 10–15 см происходит довольно заметное усиление вибрации.

Лед оказывает существенное влияние на динамические характеристики корпуса судна.

Анализ натуральных экспериментальных исследований вибрации, проведенных во льдах на ледоколах, показал следующее:

– значения низших собственных частот их корпусов под влиянием окружающих ледовых полей даже сравнительно небольшой толщины могут уменьшаться в пределах от 1–5% на судах большого водоизмещения и до 7–13% на судах меньшего. Снижение собственных частот происходит в пределах первых четырех тонов вертикальных колебаний корпуса из-за влияния, которое оказывает лед на величину присоединенных масс воды;

– формы свободных колебаний корпуса судна, находящегося в окружении ледового поля, также несколько изменяются вследствие того, что плоскость ледового поля на поверхности воды ограничивает возможность свободного перетекания забортной воды, приведенной в движение колебаниями корпуса и определяющей величину присоединенных масс. В частности, например, наличие сплошного ледового поля препятствует образованию поверхностных волн. Однако в практической работе это так же, как и изменение значений собственных частот корпуса, считается мало существенным и не учитывается.

Поэтому можно отметить, что ледовые поля, окружающие судно, в принципе, оказывают достаточно заметное влияние на частоты собственных колебаний его корпуса, однако при практических расчетах вибрации этим влиянием пока пренебрегают как уточнением, находящимся в пределах погрешности практических расчетов.

Гораздо более значительное, а на низших собственных частотах даже весьма значительное, влияние ледовые поля оказывают на демпфирование. Данные публикации [9], по-

Таблица 1

Коэффициенты усиления вибрации корпуса в различных льдах

Точка измерений	Ледовые условия	Частоты, Гц					
		2	4	8	16	31,5	63
164 шп. корма, главная палуба	Серые льды 10-15см	2 - 5	2	2	-	-	-
	Тонкие 60-70 см торосистые льды	10 - 30	4 - 6	1,5 - 3	2	2	-
	Лед средней толщины 90-130 см	6 - 10	6 - 10	7 - 10	3 - 5	2 - 3	-
44 шп.	Серые льды 10-15 см	2 - 5	2 - 6	1,5 - 2	2 - 5	1,5	1,5
Надстройка	Тонкие 60-70 см торосистые льды	6 - 30	6 - 16	2 - 3	2 - 3	2	1,5
3-й ярус	Лед средней толщины 90-130 см	3 - 16	3 - 13	3 - 14	2 - 4	2 - 3	-

лученные в результате прямого эксперимента при возбуждении виброгенератором колебаний корпуса ледокола «SISU» на чистой воде и во льдах различной толщины, показывают, что наличие ледового поля вокруг судна значительно увеличивает, особенно на низших собственных частотах корпуса, рассеяние энергии колебаний и соответственно снижает коэффициенты динамичности при резонансах (рис. 3).

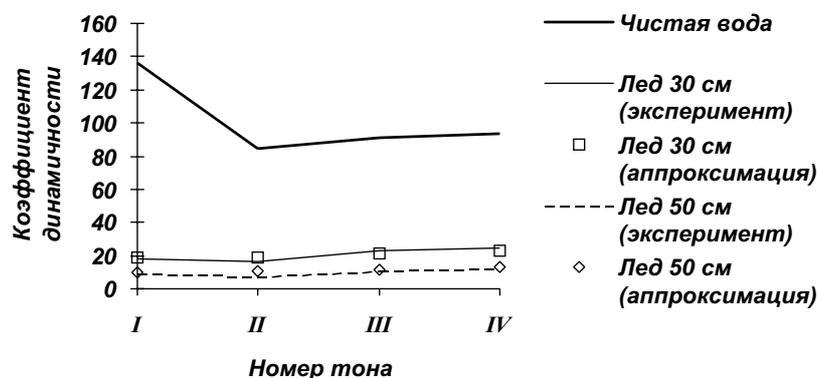


Рис. 3. Значения коэффициентов динамичности корпуса ледокола «SISU» на частотах первых четырех тонов вертикальных собственных колебаний на чистой воде и во льдах толщиной 30 и 50 см.

В процессе исследований влияния льда на характеристики демпфирования колебаний корпуса, были выявлены следующие закономерности:

- наибольшее демпфирующее влияние льда проявляется на первом тоне поперечных колебаний корпуса и выражается в уменьшении коэффициента динамичности в 4–6 и даже до 10 раз и более в зависимости от толщины, сплоченности и других характерных параметров ледового поля;

- с увеличением номера тона колебаний влияние присутствия льда вблизи корпуса на высоту его резонансных пиков, а следовательно, и на численные значения коэффициентов динамичности, довольно быстро уменьшается и уже на шестом-седьмом тоне практически прекращается.

Таким образом, очевидно, что влияние ледовых условий плавания практически сводится к весьма существенно уменьшению коэффициентов динамичности на частотах нескольких первых тонов его поперечных колебаний и может не учитываться при решении вопросов, связанных с определением других динамических характеристик – собственных частот и форм колебаний.

Вместе с тем следует констатировать, что имеющиеся экспериментальные данные не позволяют получить полную картину динамического поведения во льдах транспортных судов. В частности, отсутствуют данные о ходовой вибрации большегрузных судов, оснащенных Азиподами, нет сведений о влиянии ледовых условий на усилия генерируемые малооборотными дизелями, нет достаточных данных о самостоятельном движении транспортных судов в ледовых полях.

Банк экспериментальных данных по ходовой вибрации судов в ледовых условиях необходимо пополнять. С этой точки зрения, нельзя не приветствовать высокоширотную арктическую экспедицию «Арктика–2005» на судне «Академик Федоров», организованную в рамках Федеральной целевой программы «Мировой океан», в ходе которой специалистами ААНИИ по просьбе НПО «Полярная звезда» будут проведены натурные измерения параметров прочности и вибрации при движении судна во льдах.

Повышенная вибрация, как известно, расстраивает работу приборов и механизмов, затрудняет использование судна по его функциональному назначению, вызывает разрушения корпусных конструкций, ухудшает условия оби-

таемости [18, 19]. При движении судна во льдах все перечисленные негативные факторы реализуются в полной мере. Особенно неблагоприятно дела обстоят с вибрацией в обитаемых помещениях судна, где требования санитарных норм вибрации СН.2.5.2.048–96 могут превышать на 10–20 дБ и более. Повышенные уровни вибрации, воздействующие на организм человека, вызывают переутомление, рассеива-

ние внимания и, как следствие, навигационные ошибки. Согласно статистике, до 25 % ледовых повреждений, фиксируемых на судах, являются следствием ошибок экипажа. Заметим, что для транспортного судна, перевозящего углеводородное сырье, повреждение корпуса может быть чревато экологической катастрофой. В долгосрочном плане повышенные уровни вибрации вызывают хронические заболевания и раннее списание квалифицированных специалистов на берег.

Как уже отмечалось, при движении судна во льдах значительно возрастают неуравновешенные вибрационные усилия, генерируемые гребными винтами, меняется их частотный спектр. Наряду с традиционными усилиями первого лопастного и двойного лопастного порядков активно проявляются усилия тройной лопастной и даже

четвертой лопастной частоты. Кроме того, возникает и стабильно поддерживается так называемая ледовая вибрация, происходящая с основными частотами вертикальных, траверзных и продольных колебаний корпуса судна и являющаяся следствием импульсного взаимодействия корпусных конструкций со льдом. Также активно, как и на чистой воде, проявляются вибрации, генерируемые главными и вспомогательными двигателями. В результате все частотные октавы, регламентированные требованиями санитарных норм вибрации, оказываются заполненными. В связи с уплотнением спектра возмущающих усилий значительно возрастает вероятность возникновения резонансных колебаний корпуса судна, его надстройки и обитаемых палуб надстройки. В случае реализации такой вероятности вибрационные условия обитаемости при движении судна во льдах становятся невыносимыми со всеми вытекающими последствиями, значительно возрастает вероятность вибрационных повреждений корпусных конструкций.

Поэтому на стадии технического проектирования судна активного ледового плавания особое внимание должно быть уделено вопросам исключения резонансных колебаний основных тонов корпуса судна, надстройки и обитаемых палуб надстройки.

Современные структурные методы с использованием пространственных расчетных схематизаций позволяют достаточно точно спрогнозировать параметры собственных колебаний корпуса, надстройки и палуб надстройки. Однако этой необходимой процедуре не всегда на стадии проектирования уделяется должное внимание. Так, на танкере ледового плавания пр. 20070 повышенная вибрация корпуса судна оказалась обусловленной неуравновешенным моментом дизеля 2-го порядка (4.1 Гц) на режиме хода 123 об/мин, который оказался близким к частоте 7-го тона собственных колебаний корпуса при полной загрузке судна (осадка 9.0–9.2 м). Наиболее радикальным средством борьбы с повышенной вибрацией в данном случае является установка на дизель компенсатора неуравновешенного момента. Завод-строитель ФГУП «Адмиралтейские верфи» при решении возникшей проблемы пошел по другому пути – перерегулировки главного дизеля на режим полного хода 127 об/мин. Танкера пр. 20071, в отличие от аналогичных судов пр. 20070, имеют в танковой части продольную переборку. Это обстоятельство привело к увеличению собственных частот корпуса.

Для их определения на танкере «Саратов» были проведены измерения ходовой вибрации корпуса при плавном подъеме оборотов [10]. Подъем частоты вращения гребного винта осуществлялся в диапазоне 60–120 об/мин. При этом диапазон частот 2-го порядка составлял 2.0–4.23 Гц. Значения низших собственных частот вертикальных колебаний корпуса танкера сведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения низших собственных частот вертикальных колебаний корпуса

Тон	Осадка, м		
	6.03 м	9.16 м	9.8 м
1	1.32 Гц	1.18 Гц	1.15 Гц
2	2.82 Гц	2.43 Гц	2.37 Гц
3	4.16 Гц	3.43 Гц	3.05 Гц
4		4.25 Гц	3.6 Гц

Анализ результатов измерений позволяет заключить, что установка продольной переборки в танковой части корпуса танкера пр. 20071 привела к улучшению вибрационной обстановки на танкере при плавании в грузу. Однако при плавании в балласте вызывает опасение близость частоты второго порядка к частоте 3-го тона корпуса.

В исследовательских целях было выполнено расчетное прогнозирование параметров собственных колебаний корпуса одного из проектных вариантов ледового танкера дедвейтом 70 000 т.

Основные проектные характеристики судна

Тип судна	Танкер
Класс судна	RMRS KM+LU6 (1) A1 Oil Tanker (ESP)
Длина между перпендикулярами, м	229.3
Ширина, м	34
Высота борта, м	20.8
Осадка, м	13.6
Скорость, уз	16
Главные двигатели	Дизель-генераторы 4×6L46C “Wartsila”, 4×3600 кВт
Число винтов	2
Число лопастей	4
Диаметр, м	5.6
Частота вращения, об/мин	115
Упор, кН	2 x 600

Расчетная модель корпуса показана на рис. 4.

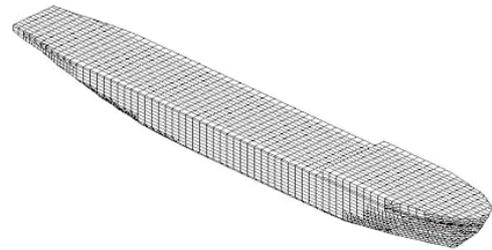


Рис. 4. Расчетная модель корпуса танкера дедвейтом 70 000 т

Значения собственных частот корпуса в диапазоне ходовой вибрации до лопастной частоты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения частот свободных колебаний корпуса, Гц

Тон	Балластное водоизмещение 21 700 т	
	Вертикальные колебания	Траверзные колебания
1	0.95	2.12
2	1.73	3.9
3	2.93	6.5
4	4.55	10.5
5	6.65	
6	7.45	

Формы свободных колебаний корпуса первых трех тонов приведены на рис. 5 – 7.

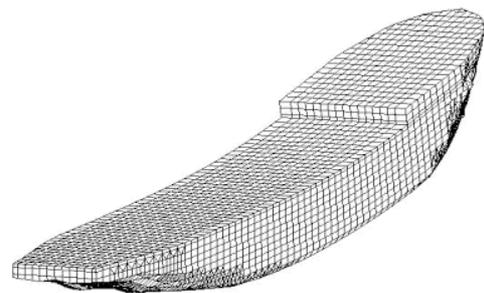


Рис. 5. Форма 1-го тона свободных вертикальных колебаний корпуса танкера

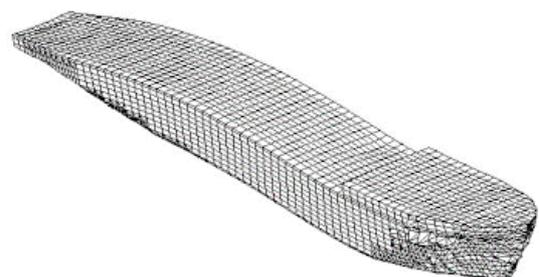


Рис. 6. Форма 2-го тона свободных вертикальных колебаний корпуса танкера

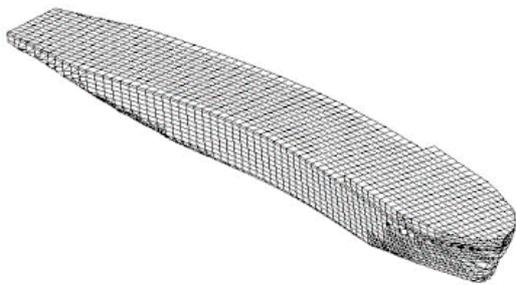


Рис. 7. Форма 1-го тона свободных поперечных колебаний корпуса танкера

Из результатов расчетных исследований можно сделать следующие выводы.

При движении судна на полном ходу в балласте возникновение резонансов возможно (см. рис. 8):

- с частотой 1-го порядка:
 - 1-го тона горизонтальных колебаний;
 - 2-го тона вертикальных колебаний;
- с частотой лопастного порядка:
 - 6-го тона вертикальных колебаний.

Как видно, расчетное моделирование свободных колебаний корпуса судна дает вполне достаточную информацию для своевременного проектного исключения резонансных колебаний корпуса. Надо только этой информацией правильно и своевременно распорядиться.

Надстройка современного транспортного судна представляет собой весьма сложное сооружение, динамически взаимодействующее с корпусом судна. Тем не менее современные структурные методы обеспечивают точность расчетного прогнозирования собственных частот надстройки корпуса 8 – 10 % [10]. Несмотря на достаточно высокую точность расчетного прогнозирования, в технологический цикл постройки судов на ФГУП «Адмиралтейские верфи» внедрены натурные частотные испытания конструкций надстроек и обитаемых палуб надстройки. Методика частотных испытаний разработана и внедрена под научным руко-

водством д-ра техн. наук, проф. В.Л.Александрова [11]. Наличие такой методики позволило специалистам «Адмиралтейских верфей» решить проблему санитарных норм вибрации для танкеров различных проектов, создаваемых на заводе в последнее десятилетие. Проведение частотных испытаний надстроек и палуб надстроек является совершенно обязательным для судов ледового плавания.

Соотношение между собственными частотами надстройки и лопастной частотой является одним из главных факторов, определяющих уровни ходовой вибрации палуб помещений в октаве 8 Гц.

Собственные частоты надстроек танкеров про. 20070 и 20072 определялись при проведении специальных частотных испытаний на заказах 02730 и 02733 в период швартовных испытаний у стенки завода.

Возбуждение колебаний надстройки производилось дебалансным вибровозбудителем, установленным на палубе ходового мостика. Регистрация колебаний производилась с помощью вибропреобразователей, установленных по левому и правому бортам на всех ярусах надстройки. В результате испытаний установлено, что собственные частоты надстроек обоих проектов практически равны и составляют:

- 10.8 Гц – 1-й тон продольных колебаний;
- 16.2 Гц – 1-й тон крутильных колебаний.

Расчетные значения основных частот надстройки, определенные на стадии технического проектирования, составили соответственно 11.5 и 15.2 Гц. Расчетные формы показаны на рис. 9.

Таким образом, собственные частоты далеки от лопастной частоты (8.4–8.8. Гц), и резонансные колебания надстроек исключены. Результатом этого обстоятельства явилось отсутствие серьезных проблем с вибрацией в помещениях в октаве 8 Гц.

Палубы обитаемых помещений надстроек судов ледового плавания хорошо моделируются плоскими балочными перекрытиями, что позволяет обеспечить точность расчетного прогнозирования собственных частот вертикальных

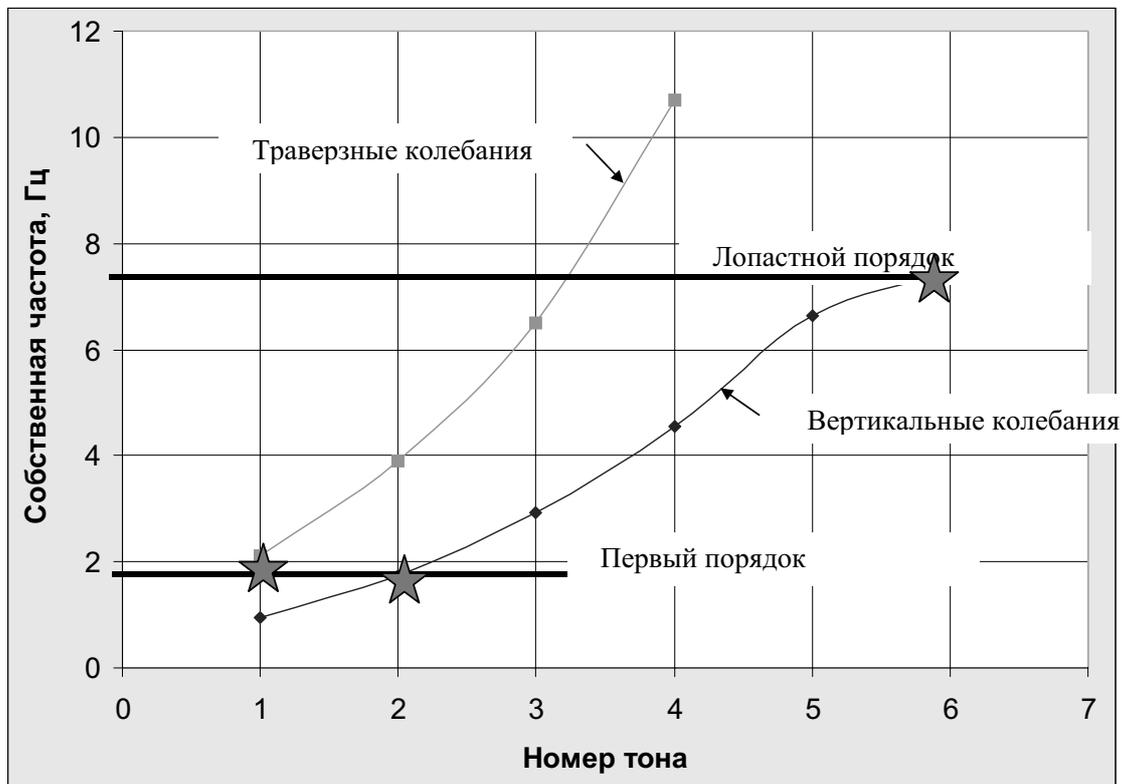
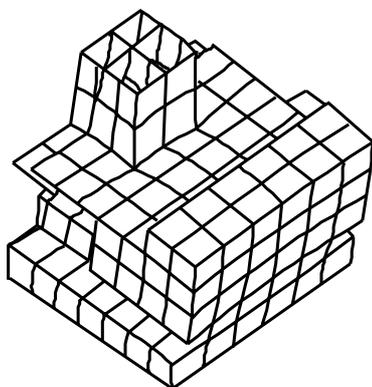
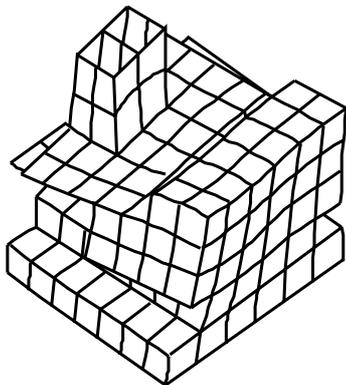


Рис. 8. Сопоставление собственных частот корпуса с частотами первого порядка и лопастного порядка



Основной тон продольных колебаний



Основной тон крутильных колебаний

Рис.9. Расчетные формы основных тонов колебаний надстройки ледового танкера пр. 20 070

колебаний палуб корпуса 3 – 5 % [12]. Вместе с тем следует иметь в виду, что типовые конструкции палуб надстроек, применяемые в настоящее время, не являются достаточно жесткими. В результате даже во внерезонансных зонах уровни вибрации центра поля палубного перекрытия могут превышать уровни ходовой вибрации опорного контура перекрытия на 5–6 дБ [13].

Таким образом, можно утверждать, что сегодня существуют все необходимые предпосылки, чтобы на судах активного ледового плавания на стадии проектирования исключить резонансные колебания корпуса судна, надстройки и палуб надстройки с частотами, генерируемыми гребными винтами и главным двигателем. Специально подчеркнем, что это не теоретическая возможность, а практически реализованный подход [14].

Сложнее обстоит дело с ледовой вибрацией. Как уже отмечалось, ледовая вибрация – неизбежный атрибут судна, движущегося во льдах. Причем наиболее негативным проявлением ледовой вибрации является импульсный резонанс, когда частота импульсов, воздействующих на корпус судна со стороны ледового поля, оказывается близкой к одной из основных собственных частот корпуса судна. Последствием такого импульсного резонанса оказывается существенное превышение санитарных норм вибрации в частотной октаве со среднегеометрическим значением частоты 2 Гц. Разумеется, импульсный резонанс допускать нельзя, однако традиционные методы борьбы с резонансными колебаниями в данном случае не годятся. Дело в том, что частота импульсного воздействия сугубо случайная величина, определяемая скоростью хода, состоянием льда, его толщиной и сплоченностью. Другими словами, в системе «частота корпуса–частота импульсного воздействия» детерминированной оказывается лишь первая частота. В этих условиях построение математической модели взаимодействия корпуса и льда и попытка с ее помощью спрогнозировать частоту импульсов малоэффективна вследствие большого числа случайных факторов, определяющих эту частоту,

хотя надо отметить ряд решений, полученных в этой области [7, 8]. Наиболее рациональным методом борьбы с импульсными резонансами представляется постоянный инструментальный мониторинг ходовой вибрации судна в частотном диапазоне 0.3–6 Гц с выдачей судоводителю рекомендаций по выбору в данных конкретных ледовых условиях скорости движения судна, исключающей частоты воздействия ледовых импульсов с основными собственными частотами корпуса судна.

Следует подчеркнуть, что мониторинг параметров ледовой вибрации – единственный по-настоящему эффективный метод преодоления ее негативных последствий. Причем этот мониторинг может осуществляться как независимо, так и в рамках интегрированной интеллектуальной системы повышения эксплуатационной надежности судна, где одновременно с параметрами вибрации контролируются параметры прочности корпусных конструкций, а также мореходности и непотопляемости судна [15]. Разработку такой интегрированной системы осуществляют в настоящее время специалисты НПО «Полярная Звезда» совместно со специалистами ФГУП «Адмиралтейские верфи» применительно к ледовому танкеру дедвейтом 70 000 т.

Наиболее виброзагруженными районами при движении судна во льдах оказываются его кормовая и носовая оконечности. В корме локализуются усилия, генерируемые гребными винтами, валами и главными двигателями, в носу – усилия ледовой вибрации. В этих условиях традиционная схема расположения обитаемой надстройки должна быть пересмотрена. С точки зрения обеспечения приемлемых условий вибрационной обитаемости наиболее рациональным районом расположения надстройки на судне активного ледового плавания является средняя часть судна.

Проблема повышенной вибрации судов активного ледового плавания представляет собой системную проблему, решение которой возможно лишь на основании комплексного использования средств расчетного моделирования, проектно-технологических средств, средств амортизации и виброизоляции, индивидуальной виброзащиты, средств постоянного мониторинга параметров ходовой вибрации в ледовых условиях, средств и методов натуральных частотных испытаний. Особое место в системе мероприятий по борьбе с повышенной вибрацией должны занимать натурные экспериментальные исследования параметров ходовой вибрации судов различных типов и назначений в ледовых условиях.

Проведенные исследования показали следующее:

1. Ходовая вибрация, возникающая при движении судна в ледовых условиях, оказывает гораздо больше влияния на параметры эксплуатационной надежности судна, безопасности мореплавания, коммерческую эффективность, чем ходовая вибрация, проявляющаяся при движении судна по чистой воде. Причинами этого являются не только существенный рост уровней ходовой вибрации при движении судна во льдах (по сравнению с чистой водой ходовая вибрация может возрастать в 10 – 20 раз), но и принципиальное изменение характера вибрации. При движении судна во льдах все негативные явления повышенной вибрации проявляются в концентрированном виде, расстраивается работа приборов и механизмов. Так, на атомоходе «Арктика» из-за повышенной вибрации была нарушена работа гребного электродвигателя, получили повреждения корпусные конструкции. На многих судах арктического плавания фиксировались разрушения [17, 18], носящие усталостный характер. Общим местом стали многочисленные жалобы экипажей на повышенную утомляемость и расстройство здоровья под воздействием повышенных уровней вибрации и, как следствие, навигационные ошибки. Поэтому в ряду проблем, которые приходится решать при создании транспортных судов активного ледового плавания, проблема повышенной вибрации стоит на особом месте и должна

отслеживаться на всех стадиях жизнедеятельности судна – проектирования, постройки, эксплуатации.

2. Ходовая вибрация при движении судна во льдах имеет два выраженных частотных диапазона. Первый частотный диапазон охватывает октавы 2 и 4 Гц. Второй – октавы 8, 16, 31.5, 63 Гц. В частотной октаве 4 Гц оба диапазона могут накладываться друг на друга. В первом частотном диапазоне ходовая вибрация носит случайный импульсный характер и является следствием динамического взаимодействия корпуса судна со льдом. Частота воздействия импульсов, их продолжительность и структура определяются скоростью хода судна, характеристиками ледового поля, наличием или отсутствием снежного покрова и т.д. В случае, если частота импульсов оказывается близкой к одной из основных частот корпуса судна, развивается явление импульсного резонанса. Такого рода вибрацию принято называть ледовой, реализуется она, как правило, в виде колебаний по основным тонам корпуса судна. Во втором частотном диапазоне вибрация носит детерминированный, условно-стационарный характер и определяется неуравновешенными усилиями, генерируемыми гребными винтами, главным и вспомогательным двигателями.

3. Уровни ходовой вибрации, фиксируемые в жилых и служебных помещениях судов активного ледового плавания, определяются следующими факторами:

- уровнем возмущающих усилий;
- соотношением собственных частот корпуса судна, обитаемой надстройки и жилых палуб надстройки.

Поэтому важнейшим направлением борьбы с повышенной вибрацией судов активного ледового плавания являются снижение уровней возмущающих усилий и исключение резонансных колебаний перечисленных выше конструкций. Исключение резонансных колебаний во втором частотном диапазоне – традиционная для современной технической теории вибрации судов задача. Опираясь на структурные вычислительные методы и натурные частотные испытания, эта задача может быть решена достаточно эффективно.

Сложнее обстоят дела с исключением импульсных резонансов в 1-м частотном диапазоне. Построение математической модели процесса взаимодействия корпуса со льдом в данном случае помогает мало, поскольку такие модели дают только вероятностные оценки на базе комплекса неопределенных параметров. Единственно эффективным средством борьбы с импульсными резонансами является постоянный инструментальный мониторинг параметров ходовой вибрации с выдачей судоводителю рекомендаций по выбору скорости движения судна в данных конкретных ледовых условиях.

В рамках одной статьи трудно рассмотреть все аспекты такой сложной и многофакторной проблемы, как ходовая вибрация судна в ледовых условиях. Автор и не ставил перед собой такой задачи. Его целью было на базе имеющихся разрозненных экспериментальных данных по вибрации судов при их движении во льдах попытаться определить первоочередные задачи борьбы с повышенной вибрацией судов активного ледового плавания и показать, что рассматриваемая проблема является системной и ее эффективное решение возможно лишь на базе комплексного применения теоретических, экспериментальных, алгоритмических, а также конструкторских и технологических средств и методов борьбы с повышенной вибрацией. Обязательным элементом этого комплекса мероприятий должен являться постоянный инструментальный мониторинг параметров ходовой вибрации при движении судна во льдах. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Буданов Д.А., Никольский Ю.А. Особенности ходовой вибрации корпуса судна при плавании во льдах.

Polartech'96 International Conference on Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Regions, September 24-26, 1996, Krilov Shipbuilding Research Institute, St. Petersburg, Russia.

2. Никольский Ю.А. Анализ вибрации транспортных судов при плавании во льдах и перспективы обеспечения на них удовлетворительных условий обитания. Конференция по строительной механике корабля памяти Ю.А.Шиманского. –Тр. НТО им.акад.А.Н.Крылова. СПб., 2001.
3. Зинченко В.И., Кустов С.Б., Костюк К.А. Результаты исследований шума и вибрации на ледоколах типа «Капитан Сорокин». –Тр. ЦНИИМФ, 1979, вып. 248, с.51-68.
4. Исследование низкочастотной вибрации на ледоколах типа «Арктика» в эксплуатационных условиях. –Отчет ЦНИИМФ, Л., 1980.
5. Рекомендации по снижению шума и вибрации на судах ледового плавания по результатам испытаний судов типа СА-15. –Отчет о научно-исследовательской работе ЦНИИМФ, Л., 1984.
6. Кудишкин В.С. Экспериментальное изучение ледовой вибрации д/э «Обь». – Тр. 18-й САЭ.–Л., Гидрометеиздат, 1978, с. 140-143.
7. Кудишкин В.С. Резонансные колебания корпуса судна при действии импульсных ледовых нагрузок. –Тр. ЛКИ, 1978, с.56-61.
8. Хейсин Д.Е. Упругие колебания корпуса судна при действии случайных импульсных ледовых нагрузок. – Тр. ААНИИ.– Л., Гидрометеиздат, 1973, т. 309, с.132-136.
9. Matusiak J. Dynamic Loads and Response of Icebreaker SISU During Continuous Icebreaking. Research rep. no.37, Finnish Board of Navigation, Helsinki, 1982.
10. Матлах А.П., Поляков В.И. Решение проблемы вибрационных условий обитаемости на судах транспортного флота. –Тр. НТК, посвященной 300-летию ФГУП «Адмиралтейские верфи», 2004, т. 2, вып. 1(2).
11. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах в условиях современного судостроительного производства // Судостроение.– 2000.– №3.
12. Поляков В.И. Расчетное прогнозирование вибрации палуб надстроек транспортных судов // Вопросы судостроения: Сер.: Проектирование судов.–1980.–Вып. 25.
13. Матлах А.П., Поляков В.И., Слостенин В.А. Методология расчетного прогнозирования уровней ходовой вертикальной вибрации палуб обитаемых помещений надстроек транспортных судов во внрезонансных зонах. –Тр. НТО им.акад.А.Н.Крылова, 2001, вып.31.
14. Александров В.Л. Борьба с ходовой вибрацией в процессе постройки танкеров. // Судостроение.– 1993.– № 5-6.
15. Александров В.Л., Матлах А.П., Нечаев Ю.И., Поляков В.И., Ростовцев Д.М. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях. –СПб, СПбГМТУ, 2001.
16. Анализ соответствия условиям эксплуатации судов нового пополнения. Танкер арктического плавания типа НО-5А «Вентспилс». –Отчет ЦНИИМФ, Л., 1985.
17. Барабанов Н.В. и др. Повреждения и пути совершенствования судовых конструкций. –Л.: Судостроение, 1989.
18. Подволоцкий Н.М. Опыт эксплуатации танкеров ледового плавания. Российский Морской Регистр судоходства, СПб, 2004, с.272. ■

Рецензенты: В.Е. Спиро, д-р. техн.наук, проф.
В.И. Поляков, д-р. техн.наук, проф.

Гидроакустическое подавление (ГПД) как составная часть радиоэлектронной борьбы (РЭБ) является видом радиоэлектронного подавления (РЭП) и представляет собой комплекс мер, направленных на снижение эффективности применения противником гидроакустических средств наблюдения, управления, наведения и самонаведения подводного оружия, использующего гидроакустические каналы.

В тактическом плане ГПД – вид обеспечения боевой устойчивости подводных лодок (ПЛ) и надводных кораблей (НК) путем подавления гидроакустических средств наблюдения, управления, наведения и самонаведения подводного оружия. Осуществляется постановкой преднамеренных гидроакустических помех, препятствующих установлению (способствующих потере) гидроакустического контакта с НК, ПЛ, снижением и маскировкой гидроакустических полей ПЛ и НК, имитацией их гидроакустических полей и маневренных характеристик.

Боевая устойчивость ПЛ обеспечивается повышением уровня скрытности и самообороны, позволяющим исключить (затруднить) ее обнаружение, классификацию и выдачу целеуказания на применение маневренными противолодочными силами (МПЛС) противолодочного оружия, дезинформировать их в текущей тактической обстановке. Для НК ГПД является в основном видом самообороны от самонаводящегося подводного оружия [1].

Средства ГПД можно классифицировать по целому ряду признаков:

- по способу использования акустической энергии:
 - активные – излучающие акустическую энергию;
 - пассивные – отражающие или поглощающие акустическую энергию; по способу воздействия на подавляемые объекты:
 - средства помех;
 - средства искажения гидроакустических полей;

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СРЕДСТВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ И ПОДАВЛЕНИЯ

*И.Г. Корж, капитан 1 ранга в отставке,
Ю.Ф. Тарасюк, д-р техн. наук, проф., НИЦ РЭВ ВМФ*

- имитаторы;
- комбинированные – многоцелевые приборы ГПД, имеющие режимы имитации и помех; по степени связи с применяющим их кораблем:
 - автономные: выстреливаемые, сбрасываемые, самовыходящие;
 - неавтономные: бортовые, буксируемые;
- по степени мобильности автономные средства ГПД могут быть самоходными и дрейфующими.

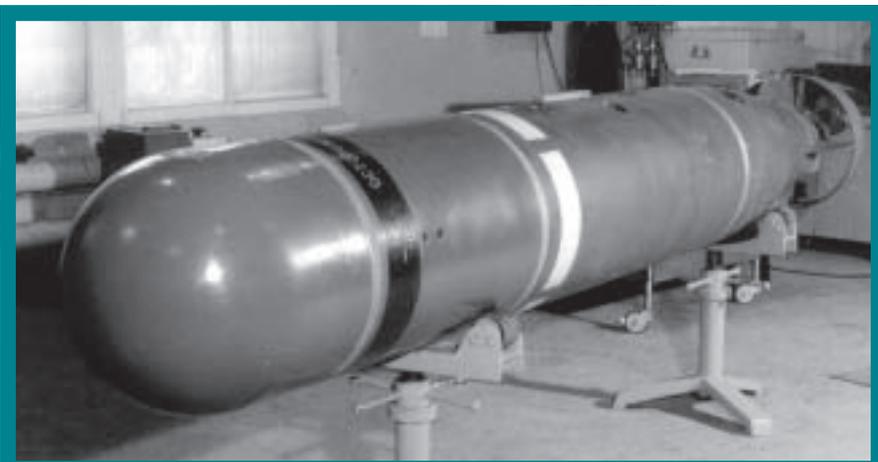
Начало созданию и развитию средств ГПД было положено образованием в 1949 г. в 6-м Научно-исследовательском морском радиолокационном институте (НИМРИ) отдела гидроакустического подавления в составе двух лабораторий [2]: активных средств ГПД (начальник С.П. Памфилов) и пассивных средств ГПД (начальник В.С. Федорищев).

Первые научно-исследовательские работы (НИР), выполненные отделом ГПД, относились к обоснованию тактико-технических заданий (ТТЗ) на опыт-

но-конструкторские работы (ОКР), направленные на создание самоходного прибора гидроакустических помех и аппарата магнитной записи (АМЗ) для имитаторов ПЛ. Одновременно выполнялись НИР, в которых исследовались возможности уменьшения отражательной способности ПЛ путем придания корпусу малоотражающих форм с применением методов масштабного акустического моделирования.

Первым практическим достижением в области ГПД была разработка НИИ-400 в 1961 г. самоходного прибора гидроакустических помех «МГ-14». Он был разработан на базе корпусно-механической части малогабаритной торпеды «Т-1» калибра 400 мм и излучателей механического типа. Главный конструктор – Д.Н. Островский. Прибор успешно подавлял ГАС противника, значительно сокращая дальность их действия.

В 50-е гг. учеными НИМРИ также были выполнены исследования, направленные на поиск путей создания дрейфующих приборов помех. В них приняли участие Э.И. Цветков, В.В. Бугаев, П.Д. Зайцев, Г.М. Шишкин, С.П. Памфилов под руководством Н.Г. Морозова. Работы увенчались созданием в 1962 г. СКБ Машиностроительного завода им. К.Е. Ворошилова Минсудпрома малогабаритного дрейфующего прибора гидроакустических помех «МГ-24» с излучателем механического типа. Прибор на заданной глубине удерживался пенопластовым поплавком, соединенным с прибором капроновой леской. Его создание положило начало разработке целого ряда малогабаритных дрейфующих приборов помех «МГ-24М», «МГ-34», «ГИП-1». В приборе «МГ-24М» в отличие от прибора «МГ-24» пенопластовый поплавок был заменен на металлический.



Самоходный многоцелевой прибор ГПД «МГ-74»



Р.А. Лукин – главный конструктор ГПД «МГ-74»

Прибор «МГ-34» был разработан СКБ завода им. В.В. Куйбышева, НИИ прикладной химии и Всесоюзным научно-исследовательским институтом телевидения (ВНИИТ). Главный конструктор – А.Д. Васильев. Прибор предназначался для отведения от ПЛ торпед с активно-пассивными акустическими системами самонаведения (АССН) путем излучения шумовой помехи и создания в воде облака из газовых пузырьков, отражающего зондирующие сигналы гидролокаторов, тем самым имитирующего эхосигналы от ПЛ.

Прибор ГИП-1 разработан НИИ прикладной химии (главный конструктор – А.А. Андреев). Предназначен для создания ложных целей путем образования в воде облака из пузырьков газа, отражающих гидроакустические волны.

Появление этих приборов на вооружении ПЛ позволило повысить эффективность решения задач, связанных с применением средств ГПД, обеспечить их постановку из уже существовавших на ПЛ пусковых установок, а также значительно увеличить их боекомплект.

По мере дальнейшего развития гидроакустических средств наблюдения противника созданные приборы ГПД стали устаревать, выявились их существенные недостатки: несоответствие спектрально-временной структуры излучаемого шума структуре шумоизлучения ПЛ, отсутствие эффекта Доплера. Это позволяло легко классифицировать приборы как ложные цели. Возникла необходимость исследования путей повышения достоверности имитации гидроакустических полей кораблей их имитаторами, совершенствования структуры и потенциала помеховых сигналов.

Дальнейшие работы 60-х гг. были направлены на совершенствование дрейфующих приборов помех и создание самоходных имитаторов ПЛ. К работам в области создания средств ГПД кроме НПО «Уран» (бывший НИИ-400) были привлечены ЛНПО «Океанприбор» Минсудпрома – в части разработки электронно-акустической аппаратуры (ЭАА), ПО «Вильма» и НПО «Маяк» Минпромсвязи – для разработки АМЗ.

Постановлением правительства разработка средств ГПД была возложена на Минсудпром и Минпромсвязи [3].

На основе результатов НИР «Звено» (научный руководитель – П.Д. Зайцев) были выполнены ОКР «Корунд», «Магма», «Ручей», в результате чего в 1967 г. появились гидроакустические имитаторы ПЛ: «МГ-44» (главный конструктор – В.Я. Зарубин), «МГ-54» (главный конструктор – В.В. Ильин), «МГ-64» (главный конструктор – Н.И. Кочеров) [4].

Имитаторы имели сложную ЭАА, позволявшую более точно воспроизводить спектрально-временную структуру гидроакустических полей ПЛ, комплекс приборов управления, позволяющий устанавливать и переключать режимы работы и программы маневрирования. Применение имитаторов позволило ПЛ решать целый ряд задач:

- уклонение от обнаружения противолодочными кораблями;
- форсирование зоны обнаружения барьера из радиогидроакустических буев (РГАБ);
- отвлечение МПЛС на ложные направления;
- создание ложных маршрутов и районов действий ПЛ;
- проведение боевой подготовки экипажей ПЛ и НК;
- обеспечение испытаний противолодочного оружия и средств противолодочной обороны.

В связи с интенсивным развитием гидроакустических средств обнаружения, освоением низкого звукового диапазона частот, развитием методов и средств классификации гидроакустических сигналов, усложнением техники и логики функционирования АССН торпед перед учеными и инженерами ВМФ и промышленности встала задача усовершенствовать существующие приборы ГПД и разработки новых. Были развернуты работы по созданию приборов нового класса – самоходных многоцелевых приборов ГПД.

В 60-е гг. был выполнен ряд комплексных НИР, направленных на исследование новых принципов построения приборов ГПД, поиск технических путей реализации новых режимов работы, совершенствование логики функционирования и тактики применения. По их

результатам были созданы многоцелевые приборы ГПД «МГ-74», «МГ-84» (от ВМФ Н.Н. Ступиченко, Д.Д. Бутнинг, П.Д. Зайцев, Г.Г. Комягин и от промышленности Р.А. Лукин, главный конструктор Б.Н. Латычевский, А.О. Марковский, Ю.П. Пелевин) [4, 5].

Создание этого прибора позволило значительно расширить круг и повысить качество решаемых средствами ГПД задач – осуществлять комплексное воздействие на ГАС (ГАК) противника: значительно снижать их дальности действия постановкой помех различного вида и отвлекать МПЛС на ложные направления путем имитации гидроакустических полей и маневренных характеристик защищающихся ПЛ. Это способствовало решению в дополнение и таких задач, как:

- срыв или затруднение слежения за подводной лодкой противолодочными силами противника;
- прорыв строя противолодочных кораблей;
- обеспечение прорыва противолодочного охранения при атаке соединения боевых кораблей или конвой.

Дальнейшее развитие гидроакустических средств обнаружения МПЛС противника происходило в направлениях снижения рабочих частот, применения сложных зондирующих сигналов, совершенствования методов обработки и классификации принимаемых сигналов.

Бурное развитие получило также подводное оружие. Совершенствовались методы телеуправления, внедрялись новые техника и логика работы АССН. Разработчиками подводного оружия был внедрен широкий спектр технических и траекторно-логических способов защиты от средств ГПД:



В.В. Ильин – главный конструктор ГПД «МГ-44»



Схема боевого использования прибора МГ-74. Уклонение от обнаружения силами ПЛО

- селекция неподвижных целей путем определения наличия доплера;
- стробирование по дистанции и углу прихода;
- селекция сигналов по амплитуде и длительности;
- классификация по угловой протяженности цели;
- применение многочастотного зондирующего сигнала в разнесенных частотных диапазонах;
- пространственная компенсация помех на базе адаптивных антенных решеток.

В середине 70-х гг. в коллектив ученых ВМФ, работающих над созданием новых и совершенствованием существующих приборов ГПД, вошло молодое пополнение: В.Г. Белов, В.Н. Бирюков, Б.И. Горохов, В.А. Исаков, И.Г. Корж, Ю.М. Пахомов, В.М. Смирнов. При их активном участии были выполнены исследования принципов и технических путей создания новых высокоэффективных приборов ГПД.

Соответственно научные поиски 70-х и 80-х гг. в области ГПД были направлены на создание низкочастотных излучателей в приемлемых массогабаритах, повышение достоверности имитации гидроакустических полей, помехового потенциала и времени работы средств ГПД за счет создания новых типов автономных источников питания. Требовалось создание средств и методов преодоления появившихся новых способов защиты АСН торпед от средств ГПД.

Особо значимый вклад в части разработки новых передовых технических решений и тактических приемов для средств ГПД внесли от ВМФ: В.Г. Белов, В.Н. Бирюков, Б.И. Горохов, И.Г. Корж, Н.Н. Ступиченко, а от промышленности: В.Н. Антонов, А.В. Байков, И.В. Гавлюк, Н.Ф. Евтушенко, В.Г. Костромитинов, Р.А. Лукин, А.О. Марковский, В.И. Шамрей. Приборы ГПД нового поколения «МГ-104», «МГ-114» соответствуют мировым уровням

и вносят значимый вклад в обеспечение боевой устойчивости кораблей и подводных лодок ВМФ [5].

Дальнейшие научные исследования в области ГПД направлены прежде всего на решение следующих задач:

- снижение массогабаритных характеристик;
- внедрение низкого звукового и инфразвукового диапазонов частот;
- поиск оптимальных по спектрально-временной структуре помех и методов их синтеза;
- увеличение времени функционирования;
- поиск путей преодоления внедренных в подводное оружие способов защиты от средств ГПД;
- создание средств ГПД, адаптирующихся к изменяющейся помехо-сигнальной и тактической обстановке. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Суханов, В. Смирнов. Системы и средства самообороны подводных лодок ВМС // Морской сборник. – 1993. – №12. – С. 12–15.
2. История развития морских вооружений. Ч. 1. – М.: Воениздат, 1989, с. 86–88.
3. Из истории отечественной гидроакустики: Сб. статей, очерков, воспоминаний. – СПб.: Изд. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1998, с. 22–26.
4. Корж И.Г. Из истории создания и развития средств ГПД в России. – Тез. доклада на XXII годичной конференции Санкт-Петербургского ИИЕТ РАН, 2001, вып. XVII, с. 182.
5. Борискин О.П., Костромитинов В.Г. ЦНИИ «Гидроприбор» и его роль в обеспечении флота средствами гидроакустического противодействия // Морская радиоэлектроника. – 2004. – № 3(9). – С. 50–51. ■

ЗАО «ПЕЛЛА-ФИОРД»

ПРОИЗВОДИТ:

- ЗАКРЫТЫЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ СПАСАТЕЛЬНЫЕ ШЛЮПКИ
- СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ ДЕЖУРНЫЕ ШЛЮПКИ
- СПУСКОПОДЪЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ СПАСАТЕЛЬНЫХ И ДЕЖУРНЫХ ШЛЮПОК, СПАСАТЕЛЬНЫХ ПЛОТОВ

Тел./Факс (812) 3804091, 3804092
Тел. (81362) 43007

**ИНФОРМАЦИЯ ПО
СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ,
СУДОРЕМОНТУ, ОБОРУДОВАНИЮ**

Корабел.ру

www.korabel.ru

Тщательное изучение процессов переформирования рельефа дна под воздействием волнения, течений и ледяного покрова в районах высокой литодинамической активности необходимо для оптимизации проектных решений систем транспортировки углеводородов и обеспечения требуемого уровня безопасности их эксплуатации. Цель настоящего исследования – построить динамическую модель формирования рельефа дна и оценить пространственно-временной характер его изменения в северной части Выборгского залива (бухта Портовая) и юго-западной акватории Балтийского моря (бухта Грайфсвальдер-Бодден).

До настоящего времени и в России, и за рубежом модели развития гидрометеорологических и литодинамических процессов для указанных районов Балтийского моря не разрабатывались. Экспериментальные данные по отдельным составляющим литодинамических процессов (экзарация морского дна ледовыми образованиями, придонные волновые течения, данные по седиментации) отсутствуют.

Для достижения цели настоящего исследования нами использована доступная архивная информация, включая материалы изысканий прошлых лет, а также выполнено численное моделирование с использованием комплекса математических моделей, включающего:

- модель приводного слоя атмосферы для расчета параметров атмосферного пограничного слоя по исходным синоптическим данным;
- модель циркуляции водных масс, описывающую ветровую дрейф и сгонно-нагонные эффекты;
- модель ветрового волнения для расчета элементов ветрового волнения и волновых движений по всей глубине водного слоя;
- модель переформирования дна в результате воздействия ледовых образований;
- модель транспорта наносов, использующей результаты расчетов по указанным выше моделям в качестве исходных данных.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЕТРА И ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

В настоящее время численное моделирование ветрового волнения основано на уравнении эволюции спектральной плотности волнового действия $N(k, \beta, \varphi, \omega)$, которое можно записать в виде

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \varphi} \varphi + \frac{\partial N}{\partial \vartheta} \vartheta + \frac{\partial N}{\partial k} k + \frac{\partial N}{\partial \beta} \beta + \frac{\partial N}{\partial \omega} \omega = G, \quad (1)$$

где N является функцией от широты φ , долготы ϑ , волнового числа k и угла β между направлением волнового вектора и параллелью (направлением на восток), а также частоты ω и времени t ; G – функция источника определяется физическими механизмами, формирующими спектр волнения. Она записывается в виде ряда компо-

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ДНА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЛНЕНИЯ, ТЕЧЕНИЙ И ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В НЕКОТОРЫХ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

С.П. Алексеев, д-р техн. наук, проф.,

С.М. Аncyфeров, д-р физ.-матем. наук, проф.,

И.Н. Давидан, д-р геогр. наук, проф.,

А.Н. Добротворский, д-р техн. наук, проф.,

В.В. Дрaбкин, канд. техн. наук,

С.А. Дружевский, И.Г. Кантаржи, д-р физ.-матем. наук, проф.,

И.В. Лавренов, д-р физ.-матем. наук,

И.О. Леонтьев, д-р физ.-матем. наук,

И.А. Неелов, канд. физ.-матем. наук, **А.М. Серебряков**

нент, из которых в основном используются следующие: $G = G_{in} + G_{nl} + G_{ds,1} + G_{ds,2}$, где G_{in} – поступление энергии от ветра к волнам; $G_{ds,1}$ – диссипация волновой энергии, связанная с обрушением гребней волн; $G_{ds,2}$ – диссипация за счет донного трения; G_{nl} – нелинейное взаимодействие в спектре ветрового волнения.

Наиболее известная западная модель WAM, основанная на решении уравнения (1), была разработана международной группой ученых WAMDI (Wave Modeling Group), исходя из следующих принципов.

Во-первых, считалось необходимым использовать наиболее точную аппроксимацию интеграла столкновений, которая сохраняет ту же кубическую структуру оператора, что и оригинальное выражение. Соответствующая аппроксимация получила название «дискретного приближения». В случае развития волн в мелководных акваториях функция слабонелинейного переноса энергии учитывает соответствующую поправку, описывающую изменение слабонелинейного взаимодействия волн в бассейне конечной глубины.

Во-вторых, функция источника была дополнена более точным механизмом диссипации, физическое обоснование которого остается открытым. Функция диссипации была получена на основе выполнения серии численных расчетов уравнения баланса энергии с точным вычислением интеграла столкновений. Это дает возможность использовать модель как глобальную. В модели учитываются рефракция и донное трение. Сама же модель классифицируется как модель ветрового волнения третьего, а затем и четвертого поколения, поскольку

в ней сделана попытка учесть взаимодействие волн с атмосферным пограничным слоем.

Позднее была разработана модель WAVEWATCH. Она по сути является развитием модели WAM в отношении параметризации функции источника, хотя аппроксимация слабонелинейного взаимодействия используется та же, что и в модели WAM. В модели WAVEWATCH применяется более совершенная численная схема решения уравнения баланса волновой энергии, чем в модели WAM.

Эти модели интересны способом параметризации физических механизмов, формирующих спектр волнения, но ни одна из них, ни WAM, ни WAVEWATCH, не учитывает слабонелинейное взаимодействие в точном представлении. Модели используют так называемое DIA аппроксимацию слабонелинейного взаимодействия в спектре волн. Кроме того, они содержат ряд подгоночных параметров.

После окончания работы международной группы WAMDI был реализован новый международный проект WISE (Waves In Shallow Environmental), который поставил своей целью продолжить исследования и создать более совершенную модель ветрового волнения применительно к мелководным акваториям. Такая модель создана и получила название SWAN (Simulating Waves Nearshore). Это модель третьего поколения, которая помимо параметризации физических механизмов, формирующих спектр волн на глубокой воде, включает дополнительно эффекты рефракции, трехволновых взаимодействий и диссипации волновой энергии, связанной с обрушением волн на мелководье.

Для численного моделирования ветрового волнения используется также модель AARI-PD2, которая является спектроразрешающей, т.е. позволяет получать оценки частотно-углового спектра и всех его интегральных параметров. Модель состоит из трех блоков:

- параметрической модели ветрового волнения, которая описывается тремя параметрами: частотой спектрального пика, нулевого момента спектра и генерального направления распространения волны;

- спектральной модели эволюции зыби;

- блока взаимодействия между ветровыми волнами и зыбью. Несмотря на ее простоту, она дает достаточно надежные результаты и обладает высоким быстродействием, что позволяет использовать ее при выполнении оперативных расчетов в реальном масштабе времени и для решения задач режимного характера, в которых необходимо рассчитывать непрерывные ряды полей ветрового волнения за десятки лет.

Следует отметить, что эта модель получила одобрение для практического использования решением Центральной методической комиссии Росгидромета. В настоящее время она используется в оперативном режиме (дважды в сутки, с пространственным шагом $2.5 \times 2.5^\circ$) в Гидрометеоцентре России для расчетов прогнозов ветрового волнения в Мировом океане.

Указанные модели применены нами для исследования процессов перестроения рельефа дна в мелководных районах Балтийского моря.

Информационной базой для выполнения расчетов ветра и волнения послужили данные реанализа приземного давления и скорости ветра европейского центра (ECMWF) за 45-летний период, которые показали лучшее соответствие фактическим наблюдениям на прибрежных станциях, чем другие источники (например, американский реанализ NCEP/NCAR).

При расчете ветрового волнения учитывалось наличие ледяного покрова и распределение глубин. С этой целью сформированы три расчетные области с различным пространственным разрешением:

- генеральная, покрывающая все Балтийское море с шагом по широте 0.25° (~27.75 км) и шагом по долготе 0.50° (~27.75 км). Генеральная расчетная область показана на рис.1.

- вложенная, покрывающая акваторию бухты Портовая с шагом по широте $0.1'$ (~185 м) и шагом по долготе $0.2'$ (~185 м);

- вложенная, покрывающая акваторию бухты Грайфсвальдер-Бодден с шагом по широте $0.541'$ (~1 км) и шагом по долготе $0.928'$ (~1 км).

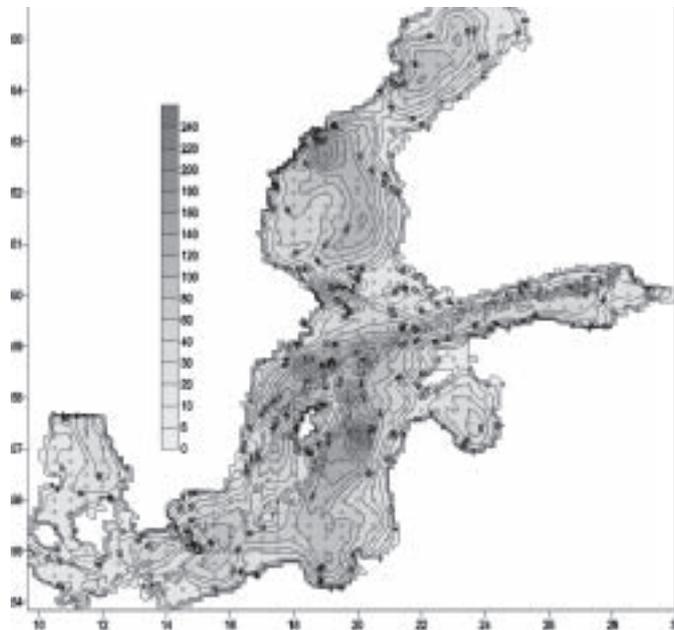


Рис.1. Расчетные точки и батиметрия для акватории Балтийского моря

Результаты расчетов по генеральной сеточной области использованы для задания граничных условий на локальных сетках.

Математическое моделирование позволило рассчитать двумерные функции распределения скоростей ветра и высот волн. По этим данным были определены направления, по которым в бухты Портовая и Грайфсвальдер-Бодден распространяется наиболее интенсивное ветровое волнение. Для них были рассчитаны значения скоростей ветра, возможные один раз в 1; 5; 10; 20; 50 и 100 лет путем аппроксимации ежегодных максимумов скоростей ветра асимптотическим распределением Вейбулла. Результаты расчетов приведены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

Таблица 1

Экстремальные значения скорости ветра, средних высот и средних периодов волн на волноопасных направлениях для глубоководной точки на подходе к бухте Портовая

Параметр	1 год	5 лет	10 лет	20 лет	50 лет	100 лет
Скорость ветра, м/с	19.0	22.7	24.6	26.3	28.3	30.0
Средняя высота, м	1.8	2.1	2.2	2.8	3.0	3.5
Средний период, с	5.6	5.7	5.8	6.2	6.5	7.0

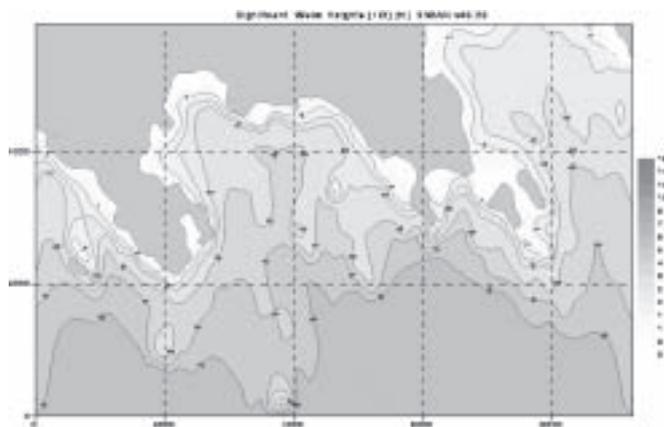


Рис. 2. Поле значительных высот волн в бухте Портовая, возможных раз в 100 лет

Таблица 2

Экстремальные значения скорости ветра, средних высот и средних периодов волн на волноопасных направлениях на входе в бухту Грайфсвальдер-Бодден

Параметр	1 год	5 лет	10 лет	20 лет	50 лет	100 лет
Скорость ветра, м/с	16.0	17.5	18.0	20.0	22.0	23.0
Средняя высота, м	1.4	2.1	2.7	3.3	4.2	4.5
Средний период, с	5.0	7.0	8.0	8.5	10.0	10.5

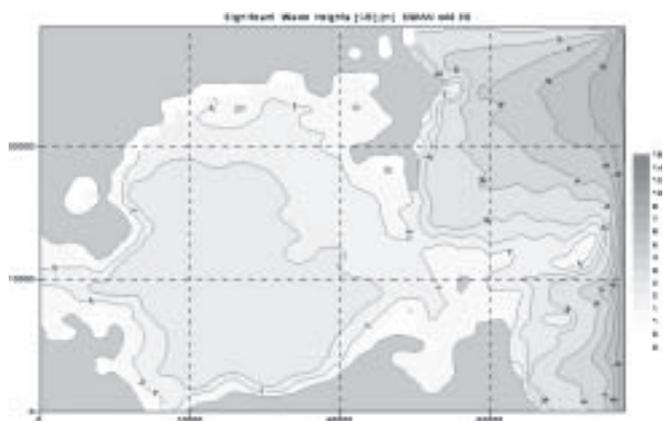


Рис. 3. Поле значительных высот волн, возможных раз в 100 лет в бухте Грайфсвальдер-Бодден

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЙ И КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ВЕТРА

В расчетах использована трехмерная гидродинамическая модель, основанная на полных уравнениях движения вязкой несжимаемой жидкости в приближениях Буссинеска и гидростатики, уравнениях переноса тепла и соли и уравнения состояния морской воды в форме ЮНЕСКО. На поверхности жидкости задается кинематическое условие и решается прогностическое уравнение для свободной поверхности. На дне и на твердых горизонтальных границах задаются соответственно компоненты вектора касательного напряжения трения и условие непротекания со скольжением. Для уравнений переноса тепла и соли на твердых границах ставятся условия теплосолеизоляции. На жид-

ких границах ставятся условия, зависящие от направления потока. В случае вытекающего потока задается радиационное условие Зоммерфельда. Для параметризации вертикального турбулентного обмена используется так называемая В-Л модель, т.е. решается уравнение бюджета турбулентной энергии с привлечением гипотезы Колмогорова, а масштаб турбулентности определяется по известной формуле Вольцингера–Монтгомери с поправкой на стратификацию жидкости.

Циркуляция Балтийского моря рассчитана для 100 слоев фиксированной толщины. Циркуляция Финского залива и в районе германского побережья рассчитана с вертикальным разрешением 10 уровней. Расчеты выполнены с шагом 9 км для акватории Балтийского моря и 250 м для Финского залива с шагом 1 км у побережья Германии.

Установлено, например, что ветровой нагон в бухте Портовая максимален при южных ветрах и составляет 100 см при скорости ветра 29 м/с и 140 см при скорости ветра 32 м/с (рис. 4).

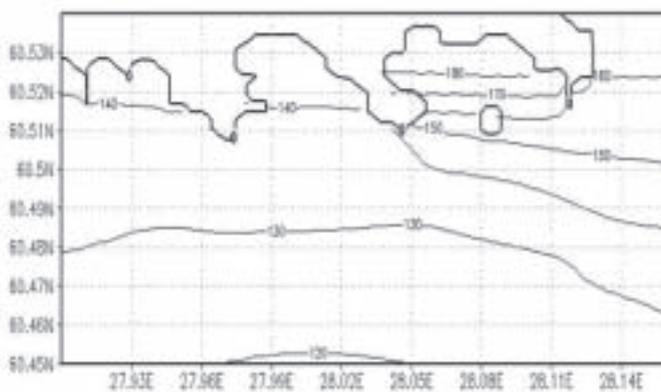


Рис. 4. Свободная поверхность (см) в районе бухты Портовая при южном ветре 32 м/с

Ветровой нагон у побережья Германии максимален при северо-восточных ветрах и достигает 120 см при скорости ветра 23 м/с (рис. 5).

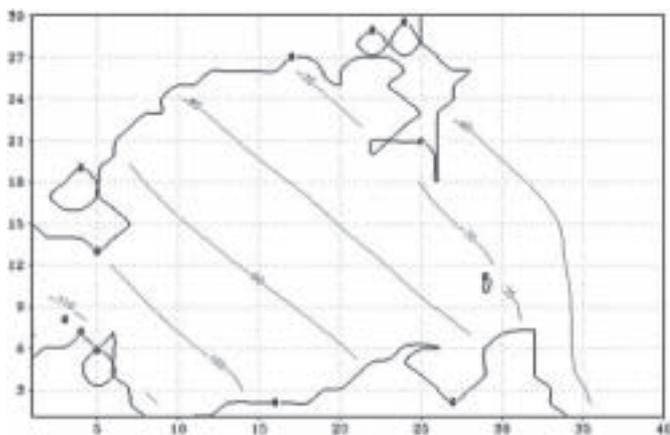


Рис. 5. Свободная поверхность (см) у побережья Германии при северо-восточном ветре 23 м/с

Поверхностные течения в бухте Портовая максимальны в прибрежных районах и достигают 20–30 см/с в северном направлении. Максимальные значения скорости течений в придонной области приурочены к центру бухты и достигают 10–15 см/с в южном направлении (рис. 6).

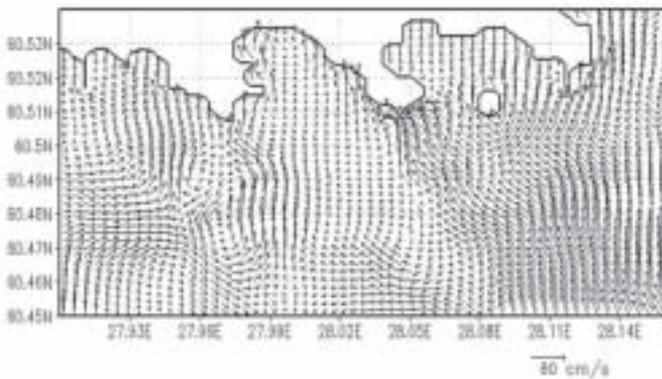


Рис. 6. Поверхностные течения в районе бухты Портвая при южном ветре 32 м/с

Максимальные значения скоростей течения в бухте Грайфсвальдер-Бодден к мелководным прибрежным районам, где они достигают 30 - 50 см/с (рис.7).

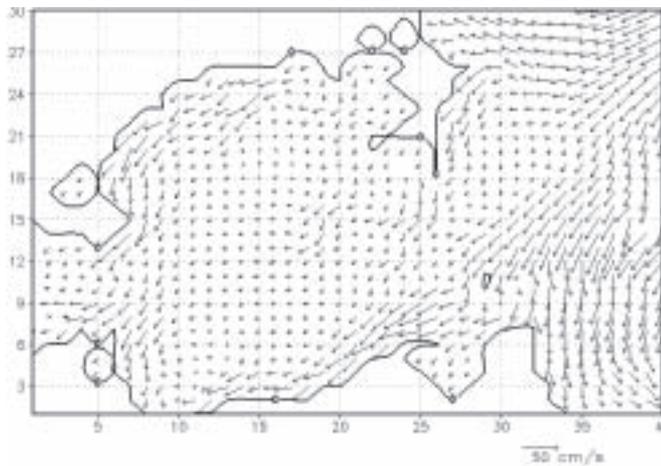


Рис. 7. Поверхностные течения в районе у побережья Германии при северо-восточном ветре 23 м/с

В прибрежных районах направление придонных течений близко к направлению поверхностных течений, а их скорости достигают 15 - 20 см/с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛЬДА

При взаимодействии дрейфующих ледяных образований с донным грунтом нередко возникают глубокие и достаточно протяженные борозды. Образование таких борозд («экзарация») может представлять серьезную угрозу целостности подводных трубопроводов. В соответствии с требованиями нормативных документов экспериментальные исследования режимных характеристик ледяного покрова должны проводиться в течение пяти лет.

Такие наблюдения в мелководных районах Балтийского моря до настоящего времени не проводились.

Модели ледовой экзарации базируются на уравнениях баланса кинетической энергии тороса и работы сил сопротивления со стороны грунта. Решение системы уравнений баланса сил сопротивления, включающей силы, нормальные и касательные к внутренней плоскости выдавливаемого грунтового клина, его вес и трение по бокам ледового образования, позволяют вычислить основные параметры образующихся борозд.

Полученные результаты используются далее для статистической оценки вероятности появления борозд определенных размеров на заданном участке шельфа с учетом параметров встречающихся торосов и возможных характеристик скорости дрейфа льда.

Эмпирически подобранный закон распределения глубины экзарации позволяет экстраполировать ее значения в область малых вероятностей.

Режимные характеристики ледяного покрова, необходимые для оценки его влияния на морское дно, получены на основе данных наблюдений за период с 1901 по 2000 гг. (средние и экстремальные характеристики ледяного покрова, сроки наступления ледовых фаз, толщина льда, размеры льдин, характеристики торосистых образований, скорости дрейфа льда при подходе к берегу).

При решении задачи о взаимодействии тороса с морским дном очень важное значение имеет вопрос об интегральной прочности подводной части тороса. Иными словами, во время контакта тороса и грунта может происходить либо разрушение тороса, либо деформация грунта (для упрощения задачи в первом приближении будем игнорировать возможный «смешанный» вариант).

В данном случае принята следующая гипотеза: киль тороса имеет в разрезе треугольную форму, а прочность килля на сдвиг возрастает от нижней точки килля к поверхности воды. Поэтому на первой стадии контакта между килем и грунтом разрушается киль, т.е. нижняя, наименее прочная часть килля отсекается. Однако с уменьшением глубины моря в контакт с грунтом вступают все более прочные слои килля, в какой-то момент он становится прочнее грунта, и начинается деформация последнего.

Допустим, что прочность килля на сдвиг пропорциональна ширине килля, и тогда его «прочная часть» расположена выше некоторого уровня, где ширина килля равна некоторому критическому значению $B_{кр}$.

Исходя из этого, можно оценить осадку прочной части килля h_{ks} (рис. 9):

$$h_{ks} = h_k - B_{cr} \operatorname{tg} \theta; \quad (2)$$

где h_k – полная осадка килля; θ – угол ската боковой поверхности килля.

Таким образом, деформация грунта начинается при глубине моря, равной h_{ks} , когда в контакт с грунтом вступает прочная часть килля.

Для оценки возможных параметров экзарации разработана динамическая модель взаимодействия тороса с морским дном. Модель учитывает такие параметры, как размеры и масса торосистого образования (включая толщину и размер льдины, на которой находится торос), скорость его движения в момент начала контакта с грунтом, угол наклона дна, характер грунта, скорость ветра (рис.8.).

Численная реализация модели для различных сочетаний ледовых, ветровых и донных условий позволила получить оценки вероятности экзарации заданной глубины в разные периоды ледового сезона.

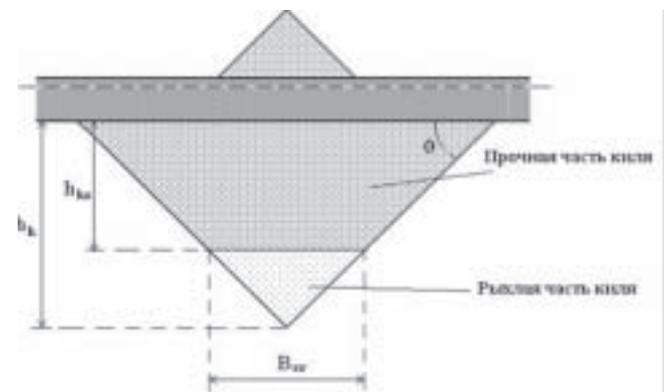


Рис. 8. Упрощенная схема распределения прочности тороса

Примеры расчета экзарации льда представлены на рис. 9 и 10.

Параметры экстремальной экзарации малой повторяемости («раз в N лет») в бухте Грайфсвальдер-Бодден

Параметр	Повторяемость 1 раз в N лет					
	1	5	10	20	50	100
Высота паруса тороса, м	1,2	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4
Скорость ветра, м/с	16	17,5	18	20	22	23
Средняя длина борозды, м	11	14	15	16	16	17
Максимальная длина борозды, м	35	36	37	37	38	40
Средняя глубина борозды, м	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04
Максимальная глубина борозды, м	0,11	0,21	0,24	0,26	0,30	0,32

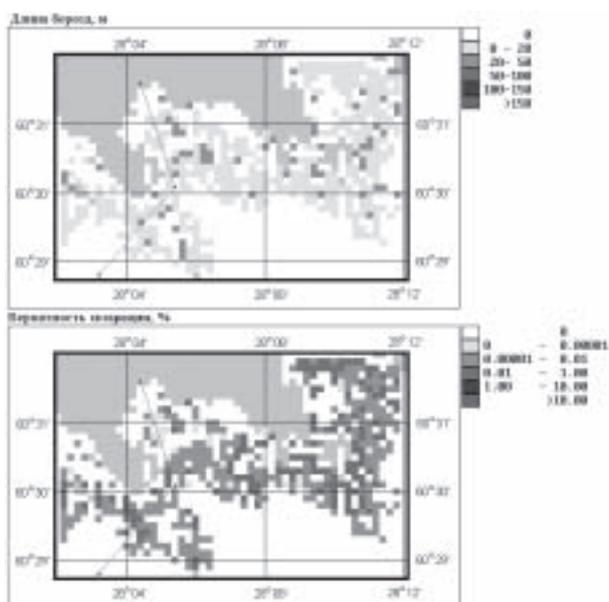


Рис. 9. Распределения длины и вероятности экзарации глубиной 0,10–0,25 м в бухте Портовая в апреле

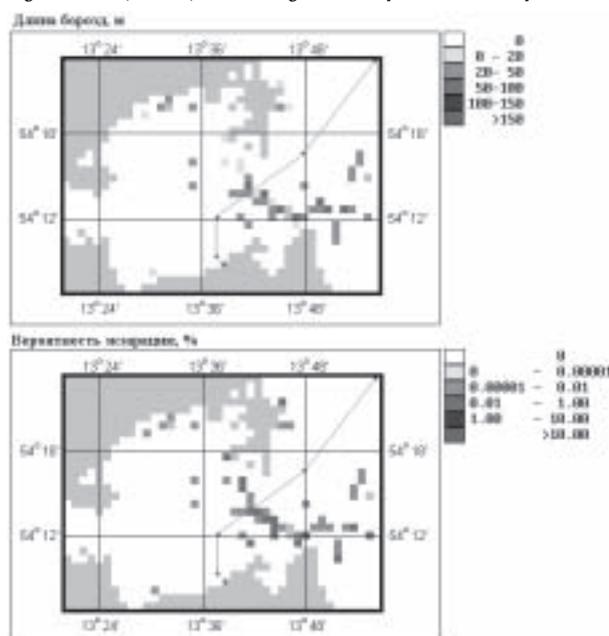


Рис. 10. Пример распределения длины и вероятности экзарации глубиной 0,10–0,25 м в бухте Грайфсвальдер в феврале

Результаты расчета параметров экстремальной экзарации малой повторяемости приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Параметры экстремальной экзарации малой повторяемости (раз в N лет) в бухте Портовая

Параметр	Повторяемость 1 раз в N лет					
	1	5	10	20	50	100
Высота паруса тороса, м	1,5	2,0	2,4	2,6	2,8	3,0
Скорость ветра, м/с	19	22	24	26	28	30
Средняя длина борозды, м	19	23	30	31	33	34
Максимальная длина борозды, м	47	48	48	50	52	53
Средняя глубина борозды, м	0,17	0,25	0,33	0,34	0,35	0,39
Максимальная глубина борозды, м	0,99	1,17	1,67	1,74	1,78	1,86

АНАЛИЗ ДАННЫХ ГИДРОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Гидролокационные исследования проводились в бухте Портовая в октябре 2004 г. На изображениях поверхности дна обнаружены следы воздействия ледовых образований, которые были частично заматы за время, прошедшее после таяния ледяного покрова (рис. 11).

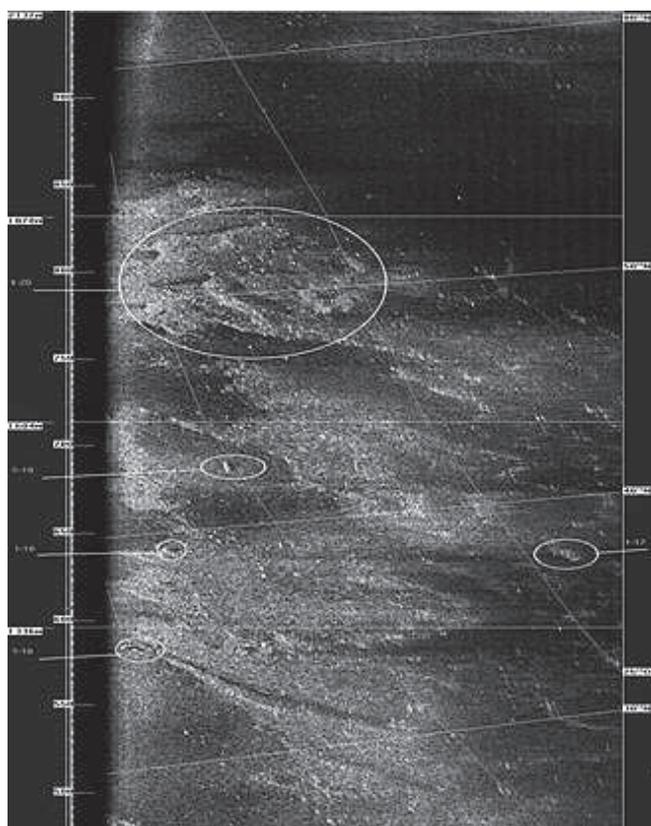


Рис. 11. Гидролокационное изображение поверхности дна со следами ледовой экзарации

Длина следов экзарации составляет до нескольких десятков метров, ширина до нескольких метров. Их положение и размеры в целом соответствуют результатам математического моделирования. Этот факт является хорошим подтверждением надежности использованных в работе математических моделей.

ДИНАМИКИ РЕЛЬЕФА ДНА

Основными причинами изменений рельефа в исследуемых районах являются деформации, обусловленные процессами размыва и аккумуляции осадков, штормовым перемещением материала, а также деформации, вызванные формированием и перемещением донных образований – рифелей и подводных валов.

Прогноз деформаций, обусловленных перемещением осадков, выполнен двумя методами: локального баланса наносов и на основе сравнения профилей динамического равновесия. Методы прошли достаточно серьезную апробацию на целом ряде крупных объектов морского гидротехнического строительства в России и за рубежом.

В нашем случае расхождение между результатами численного моделирования, полученных каждым из методов, не превышает 0,1 м. Поэтому выявленные теоретическим путем закономерности переформирования рельефа дна, хотя и нуждаются в тщательной экспериментальной проверке, но позволяют достаточно уверенно судить о характере литодинамических процессов в исследуемых районах. В целом эти закономерности по бухте Портовая сводятся к следующему:

– подлежащие учету деформации дна могут наблюдаться только в прибрежной области с глубинами менее 10 м. При этом главную роль в деформациях рельефа играют умеренные и сильные шторма южного румба, при которых размыв дна достигает 0,4 м, а аккумуляция – 0,8 м. Максимальные абсолютные значения деформаций достигаются при экстремальных штормах редкой повторяемости. В полосе глубин менее 5 м они вызывают размыв дна до 0,5 м. Вынесенный материал откладывается на глубинах 6–9 м, где толщина слоя аккумуляции может превышать 2,1 м. Достаточно существенными могут быть деформации, обусловленные миграцией подводных валов ($\pm 0,8$ м). Таким образом, границы всего диапазона потенциальных деформаций рельефа характеризуются значениями от – 0,8 м (размыв) до 2,1 м (аккумуляция).

Закономерности формирования рельефа дна в бухте Грайфсвальдер-Бодден несколько иные:

– заметные деформации дна могут ожидать в прирезовой области, включая пляж. В открытой части бухты и у входа в нее штормовые деформации пренебрежимо малы. Максимальные абсолютные значения деформаций достигаются при экстремальных штормах редкой повторяемости, действующих на фоне нагона. При этом в подводной части пляжа возможен размыв дна до 0,6 м, а в надводной его части – аккумуляция, также до 0,6 м. Процессы рифелеобразования не вносят заметного вклада в штормовые деформации рельефа. Динамические условия в бухте не исключают возможность существования подводных валов (в зоне глубин менее 3 м), миграции которых могут вызвать деформации дна в пределах $\pm 0,5$ м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическое использование результатов работы позволит оптимизировать проектные решения систем транспортировки углеводородов.

Перспективным объектом внедрения разработки могут быть морские участки северо-европейского газопровода. ■

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анциферов С.М., Кантаржи И.Г.* Расчет концентрации наносов, взвешенных волнами, распространяющимися на течении. – сб. «Водное хозяйство. Порты и портовые сооружения. Объекты строительства на шельфе». – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004.
2. *Давидан И.Н., Лавренов И.В., Пасечник Т.А.* и др. Математическая модель и метод оперативных расчетов ветрового волнения на морях СССР // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 11. – С.81-90.

3. *Доброворский А.Н., Дружевский С.А., Кушниц В.М., Петренко Л.А.* Математическое моделирование деформаций дна под воздействием гидрометеорологических факторов. – Сб. докладов IV Российской науч.-техн. конфер. «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии» (НО-2001), – Санкт-Петербург, 6-9 июня 2001 г. – ГНИНГИ МО РФ, т. 2, с. 293-298.
4. *Доброворский А.Н., Дружевский С.А., Кушниц В.М., Петренко Л.А.* Диагностическая модель деформаций дна под воздействием гидрометеорологических факторов. // Навигация и гидрография. – 2001. – № 12. – С. 112-122.
6. *Драбкин В.В., Трапезников Ю.А., Фокина М.Л.* Вероятностное моделирование ледовитости Балтийского моря // Метеорология и гидрология. – 1988. – № 5. – С. 126-130.
7. *Драбкин В.В.* Образование торосов и навалов льда при нагонах (на примере Финского залива). – Тр. ААНИИ, 1978, т. 354, с. 89-96.
8. *Драбкин В.В., Лебедев А.А.* Некоторые особенности ледового режима Финского залива. – Исследования ледяного покрова в замерзающих морях – Тр. ГИЦ РФ ААНИИ, 2001, т. 443, с. 38-47.
9. *Клячкин С.В., Сухоруков К.К.* Комплексная модель динамического и квазистатического взаимодействия торосистого ледяного образования с морским льдом. – РАО-97, 1997, 8 с.
10. *Лавренов И.В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. – СПб: Гидрометеиздат. – 1998. – 499 с.
11. *Леонтьев И.О.* Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. – М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
12. *Неелов И.А., Умнов А.А.* Модель экосистемы Невской губы / под ред. проф. В.В.Меншуткина. – В сб.: «Невская губа – опыт моделирования», СПб, 1997.
13. *Alekseev S.P., Dobrovorsky A.N., Druzhewsky S.A.* Technology of Caring Out the Sea Engineering Investigations Intended to Choose the Submarine Pipeline Routes at Preliminary Design Stage // The Proceedings of the Second 1999. ISOPE European OFFSHORE MECHANICS SYMPOSIUM; Pipelines (Moscow, Russia, ISOPE EUROMS-99). – 1999. – p. 92–93.
14. *FUGRO N.V.* Annual report, 2003–2004.
15. *Galperin, B., Kantha, L.H., Hassd, S., Rosati, A.* A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows // J. Atmos. Sci. –1988. –Vol.45. –P.55-62.
16. *Hennings I., Herbers D., Prinz K., Ziemer F.* On waterspouts related to marine sandwaves // Marine Sandwave and River Dune Dynamics – 1–2 April, 2004. – Enschede the Netherlands, CD.
17. *Hulscher J.M.N., Knaapen M.A.F., Scholle O.* Regeneration of dredged sand waves // Marine Sandwave and River Dune Dynamics – 1–2 April, 2004. – Enschede the Netherlands, CD.
18. *Komar P. D., Gaughan M.K.* Airy wave theory and breaker height prediction. – Coastal Eng. – 1972. – Proc. vol. 1. – p. 125-132.
19. *Neelov I.A., Kouraev A.V.* 3D circulation model of the Kara Sea // NIERSC Technical report N 3. – Project INTAS-93-0814. – 1996. – 49 p.
20. *Larson M., Kraus N.C.* SBEACH: numerical model for simulating storm-induced beach change. Tech. Rep. CERC-89-9. 1989. US Army Eng. Waterw. Exp. Station. Coastal. Eng. Res. Center.
21. *Lavrenov I.V.* Wind waves in Ocean. Springer-Verlag, – 2003, – 286 p.
22. *Larson M., Wise R.A.* Simple models for equilibrium profiles under breaking and non-breaking waves. Proc 26th Coastal Engrg. Conf., ASCE, – 1998. ■