

УДК 532.59:629.585:534.1

**В. Л. Земляк**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО СУДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОД ЛЕДЯНЫМ ПОКРОВОМ

*В работе приводится анализ модельных экспериментов по исследованию волнового сопротивления подводного судна при движении под ледяным покровом. Известно, что максимальные значения волнового сопротивления, действующего на погруженное тело в результате генерации поверхностных волн, соответствуют волноводному режиму распространения изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове от движения подводного судна. С целью исследования волнового сопротивления была проведена серия экспериментов в опытовом бассейне, посредством буксировки модели подводного судна под модельным льдом с использованием гравитационной буксировочной системы. В качестве модельного льда использовалась упругая пленка. Волновое сопротивление определялось как разность полных сопротивлений при малом и большом заглублениях модели. Эксперименты показали, что пику волнового сопротивления соответствовала не резонансная скорость движения нагрузки, а скорость волноводного режима волнообразования, при этом величина волнового сопротивления при движении под ледяным покровом была выше, чем при движении модели под поверхностью свободной воды. Приведены графики зависимости волнового сопротивления от различных ледовых условий.*

**Ключевые слова:** подводное судно; лед; изгибно-гравитационные волны; резонансный метод разрушения льда; резонансная скорость.

**Vitaliy L. Zemlyak. STUDY ON WAVE RESISTANCE OF A SUBMARINE MOVING UNDER AN ICE SHEET (Far Eastern State Academy for Social and Humanity Studies)**

*The paper deals with the model experiments for studying wave resistance of a submarine moving under an ice sheet. It is known that the maximum values of wave resistance affecting a submerged body as a result of generating surface waves correspond to the wave mode of propagation in an ice sheet of the flexural gravity waves caused by the motion of a submarine. To study wave resistance, a series of experiments was conducted in a model-testing basin by towing a model submarine under a model ice sheet with the help of a gravitation towing system. An elastic film was used to simulate the model ice. The wave resistance was found as the difference between complete resistances under small and large depths of submerging the model. The experiments showed that it was not the resonant velocity of the load motion but the velocity of the wave mode of the wave formation that corresponded to the peak of the*

*wave resistance, and the value of the wave resistance caused by the model motion under the ice sheet was higher than that caused by the model motion under the free water surface. The diagrams showing the dependence of wave resistance from various ice conditions are given.*

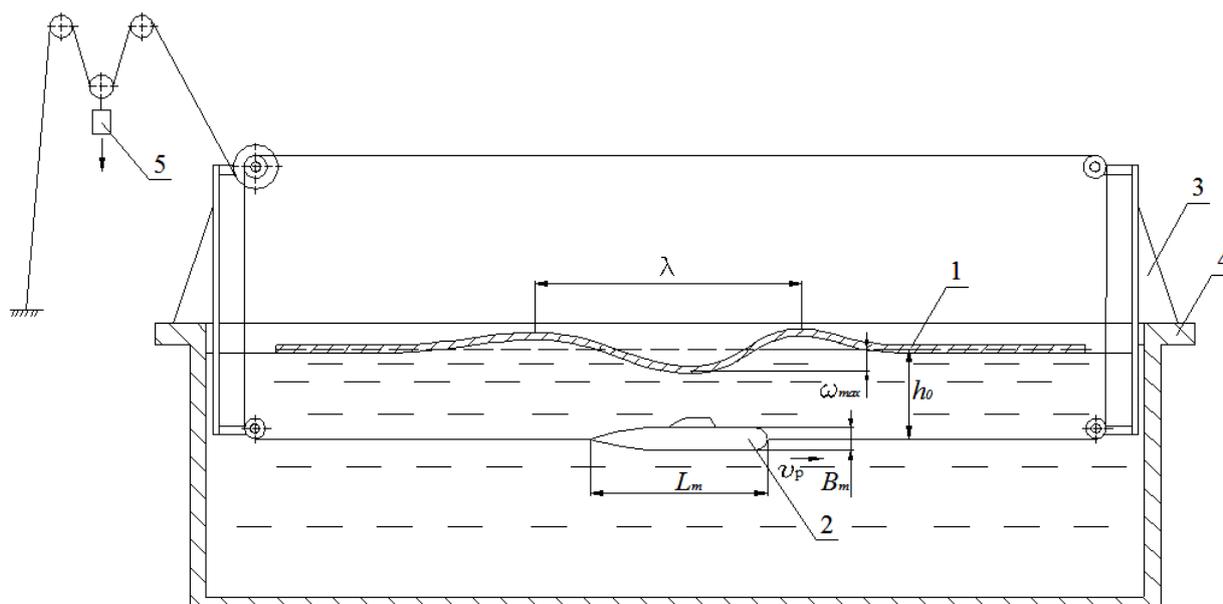
**Key words:** *submarine; ice; flexural-gravity waves; resonant method of breaking ice; resonant velocity.*

Эксплуатация подводного флота в арктических районах сопряжена с большими трудностями экстренного всплытия существующих подводных судов (ПС) при наличии ледяного покрова толщиной более 1 метра. Как показывает опыт, продолжительность всплытия традиционным способом без хода путем статического нагружения льда снизу за счет осушения балластных цистерн, исчисляется десятками минут, тогда как приемлемое время при аварийном всплытии может составлять минуты. Кроме того, такое всплытие может вызвать повреждения легкого корпуса и потерю остойчивости судна. Известно, что более чем в 60 % районов подледного пространства Арктики безопасные условия для всплытия таким способом часто отсутствуют. В связи с этим, одной из главных проблем при подледном плавании ПС является разработка такого способа всплытия, который бы снизил или полностью устранил отмеченные недостатки. Посредством возбуждения изгибно-гравитационных волн (ИГВ) в ледяном покрове ПС можно добиться частичного или полного разрушения льда, что позволит подводным судам всплывать в более толстом льду, чем при традиционном способе разрушения ледяного покрова [1]. Для этого ПС должно перемещаться подо льдом с резонансной скоростью и на определенном заглублении, тогда в ледяном покрове будут развиваться резонансные ИГВ, при этом растрескивание или полное разрушение льда будет происходить с минимальными энергозатратами.

Известно, что максимальные значения волнового сопротивления, действующего на погруженное тело в результате генерации поверхностных волн, соответствуют волноводному режиму распространения ИГВ в ледяном покрове от движения подводного судна.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение величины волнового сопротивления от движения ПС в различных ледовых условиях.

Испытания модели ПС для определения волнового сопротивления проводились в опытовом бассейне размерами  $L \times B \times H = 5 \times 1,8 \times 0,6$  м. Для проведения экспериментов была спроектирована и изготовлена гравитационная буксировочная система, схема которой представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема буксировочной системы:** 1 — модельный лед; 2 — модель подводного судна; 3 — стойки буксировочной системы с блоками проводки бесконечного буксировочного троса; 4 — чаша бассейна; 5 — подвешиваемый груз

Конструктивно система была выполнена в виде двух рам, установленных по разные стороны бассейна и оснащенных подвижными балками с блоками проводки бесконечного буксировочного троса. Изменение скорости буксировки модели ПС осуществлялось подвешиванием грузов различного веса. Буксировочная система позволяла проводить испытания модели при скоростях до 2 м/с в установившемся режиме.

Модельные эксперименты проводились при относительных скоростях  $Fr = 0,30 — 0,75$  и относительных глубинах погружения  $h_0 / L = 0,2 — 1,0$ . Буксировки модели выполнялись как под поверхностью воды, так и под ледяным покровом, в качестве которого использовалась упругая пленка толщиной 9 мм с известным значением модуля Юнга, обеспечивающая проведение эксперимента в масштабе 1–200. При проведении экспериментов в поле сплошного льда вдоль траектории движения модели ПС имитировались продольная раскрытая трещина и разводья. Относительная ширина разводий  $b_n / B_m$  (где  $b_n$  — ширина разводья,  $B_m$  — ширина судна) соответственно составляла: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8.

В качестве модели ПС использовалось тело вращения с относительным удлинением равным  $L_m / B_m = 6,5$  (где  $L_m$  — длина модели).

В ходе испытаний наибольший интерес представляла только волновая составляющая полного сопротивления, как непосредственно отвечаю-

щая за волнообразование. Поэтому моделирование производилось по критерию подобия Фруда без учета чисел Рейнольдса. В соответствии с известной методикой моделирования изгибно-гравитационных волн в сплошном неразрушаемом льду должны выполняться следующие условия подобия [2]:

$$E_n/E_m = h_n/h_m = \lambda_l,$$

где  $E_n$  — модуль упругости натурального льда,  $E_m$  — модуль упругости модельного льда,  $h_n$  — толщина натурального льда,  $h_m$  — толщина модельного льда,  $\lambda_l$  — геометрический масштаб.

Модель судна была геометрически подобна натурному судну, поэтому выполнялись условия:

$$L_n/L_m = \lambda_l, \quad D_n/D_m = \lambda_l^3,$$

где  $L_n$  — длина модели ПС;  $L_m$  — длина натурального ПС;  $D_n$  — водоизмещение модели ПС;  $D_m$  — водоизмещение натурального ПС.

Действующие силы моделируются в соответствии с условием:

$$P_n/P_m = \lambda_l^3.$$

Скорость движения модели определялась из условия:

$$v_n/v_m = \lambda_l^{1/2},$$

где  $v_n$  — скорость движения модели ПС;

$v_m$  — скорость движения натурального ПС.

Параметры модельных ИГВ пересчитывались на натуру согласно соотношениям:

$$\lambda_n/\lambda_m = \omega_n/\omega_m = \lambda_l,$$

где  $\lambda_n$  — длина натуральных ИГВ;  $\lambda_m$  — длина модельных ИГВ;  $\omega_n$  — прогиб натуральных ИГВ;  $\omega_m$  — прогиб модельных ИГВ.

Известно [3], что величина волнового сопротивления равна силе, действующей со стороны жидкости на тело и приводящей к образованию волн. Волновое сопротивление с учетом потерь на трение определялось как раз-

ность полных сопротивлений при малом и большом заглублениях модели ПС ( $h_0 / L > 1$ ), т.е. когда волнообразование отсутствовало. Из полученной величины силы волнового сопротивления определялся безразмерный коэффициент  $C_w$ , по формуле [4]

$$C_w = \frac{R_w}{0,5K_k \rho v_m^2 \Omega},$$

где  $K_k$  — коэффициент влияния удлинения корпуса, определяемый по данным В. Дубровского [5];  $\rho$  — плотность жидкости;  $\Omega$  — смоченная поверхность корпуса [6]

$$\Omega = (5,60 + 0,26 \frac{L}{B}) V^{2/3},$$

где  $V$  — объем голого корпуса;  $L/B$  — удлинение корпуса судна.

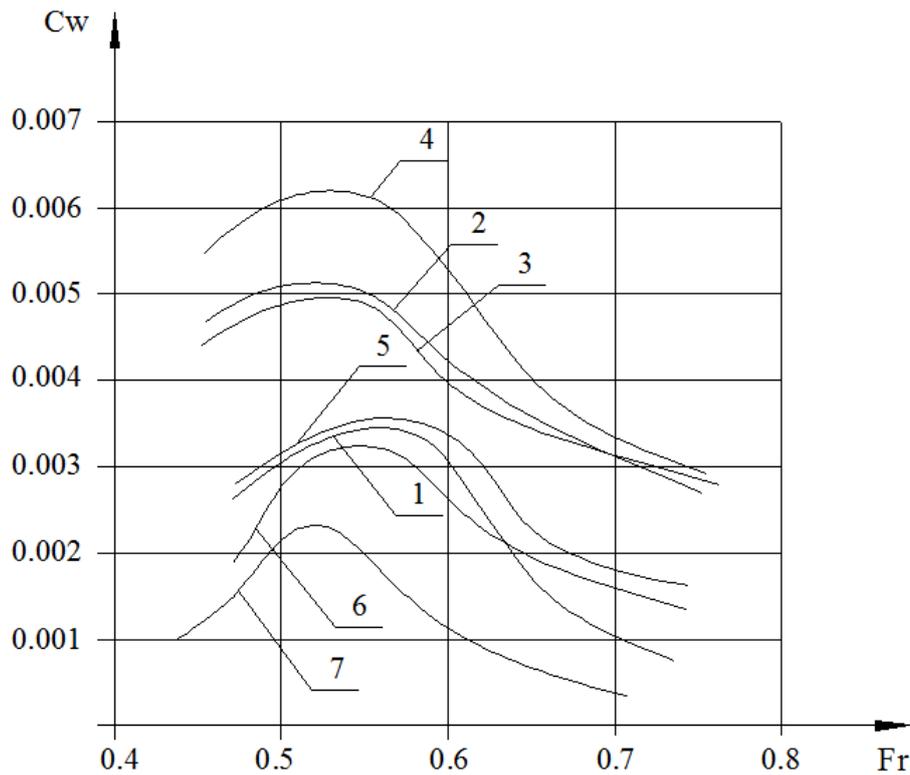
Объем корпуса для тела вращения с удлинением равным 6,5 определялся из соотношения [7]

$$V = 0,472 LB^2.$$

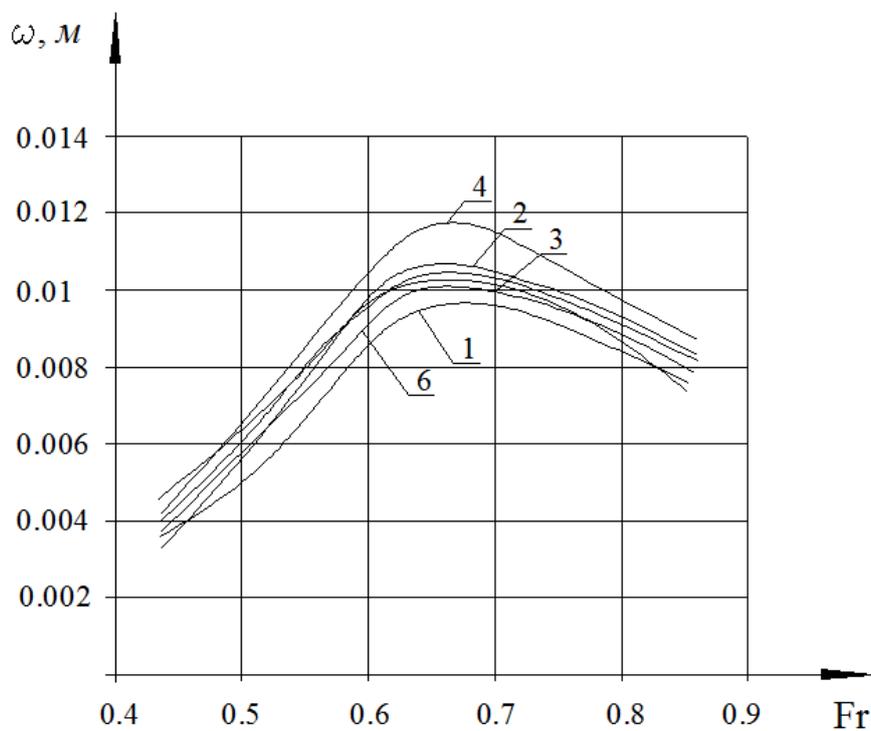
Результаты определения коэффициента волнового сопротивления и величины прогибов представлены на графиках (рис. 2–3) при относительном заглублении модели ПС  $h_0 / L_m = 0,3$ .

Выделение волновой составляющей из полного сопротивления модели ПС и анализ записей волновых профилей показал, что волнообразование, а значит и волновое сопротивление, возникают при  $h_0 / L_m < 0,5$ .

Пик волнового сопротивления при подледном движении ПС соответствовала не резонансная скорость, т.е. скорость при которой во льду распространялись ИГВ наибольшей амплитуды (рис. 3), а очевидно скорость волноводного режима волнообразования. Значение этой скорости оказалось практически равным для сплошного льда и льда имеющего свободную кромку и составило порядка  $Fr = 0,54 — 0,56$ , что превышало по величине значение горбовой скорости при движении модели под поверхностью чистой воды ( $Fr = 0,52$ ). Величина коэффициента волнового сопротивления при движении модели ПС под свободной кромкой значительно превосходила значение  $C_w$  при движении под сплошным льдом и поверхностью чистой воды (рис. 2).



**Рис. 2. Зависимость  $C_w$  от скорости движения модели ПС в различных ледовых условиях:** 1 — сплошной лед; 2 — продольная трещина; 3 — разводье с относительной шириной 0,2; 4 — разводье с относительной шириной 0,4; 5 — разводье с относительной шириной 0,6; 6 — разводье с относительной шириной 0,8; 7 — чистая вода



**Рис. 3. Зависимость прогибов льда от скорости движения модели ПС в различных ледовых условиях:** 1 — сплошной лед; 2 — продольная трещина; 3 — разводье с относительной шириной 0,2; 4 — разводье с относительной шириной 0,4; 5 — разводье с относительной шириной 0,6; 6 — разводье с относительной шириной 0,8

## Литература

1. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. и др. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005, 191 с.
2. Козин В.М. Обоснование исходных данных для выбора основных параметров СВП, предназначенных для разрушения ледяного покрова резонансным способом // Рукопись диссертации на соиск. уч. степени к.т.н.- Горький: ГПИ им. А.А. Жданова, 1983 г, 314 с.
3. Сретевский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977, 816 с.
4. Войткунский Я.И. Соппротивление воды движению судов. Л: Судостроение. 1988, 283 с.
5. Многокорпусные суда / Под ред. В. А. Дубровского. Л.: Судостроение, 1978, 304 с.
6. Букалов В. М., Нарусбаев А. А. Проектирование атомных подводных лодок. Л.: Судостроение, 1964.
7. Токмаков А.А. Подводные транспортные суда. Л.: Судостроение, 1965, 266 с.
8. Стратегия государственной антинаркотической политики Российской Федерации до 2020 года.