

11. Деревич И.В. Расчет турбулентного течения газозвеси частиц, интенсивно взаимодействующих со стенками канала // ПМТФ. — 1992. — № 6.
12. Мульги А.С. Экспериментальное исследование течения газа с однородными сферическими частицами в трубе // Турбулентные двухфазные течения. — Таллинн, 1979. — Ч. 2.
13. Tsuji T., Morikawa Y., Shiomi H. LDV measurements of an air-solid two-phase flow in a vertical pipe // J. Fluid Mech. — 1984. — V. 139, N 1.
14. Сукомел А.С., Цветков Ф.Ф., Керимов Р.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при движении газозвеси в трубах. — М.: Энергия, 1977.

г. Москва

Поступила 20/IV 1993 г.

УДК 532.526.2

В.М. Козин, А.В. Онищук

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ В СПЛОШНОМ ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ ОТ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО СУДНА

Одним из перспективных направлений в решении проблемы круглогодичной эксплуатации северных морских путей является создание подводного транспортного флота, способного под водой преодолевать ледовые препятствия. Очевидно, условия эксплуатации таких судов должны предусматривать возможность аварийного всплытия в сплошном ледяном покрове. В настоящее время технология такого всплытия заключается в статическом нагружении ледяной пластины снизу за счет создания положительной остаточной плавучести путем осушения цистерн главного балласта после предварительного подрыва льда в районе всплытия. Опыт практической реализации подобного всплытия на отечественных и зарубежных подводных лодках показывает неизбежность повреждения рубки, строений верхней палубы, а часто и легкого корпуса. Избежать этих нежелательных последствий можно путем частичного или полного разрушения ледяного покрова посредством возбуждения во льду изгибно-гравитационных волн (ИГВ) определенной амплитуды [1]. Для этого судно всплывает на безопасную глубину и движется подо льдом с определенной скоростью. В ледяном покрове развиваются ИГВ, при определенной интенсивности которых происходит растрескивание или полное разрушение льда. После чего судно возвращается в район воздействия на лед ИГВ и всплывает в ослабленном или битом льду. Данная технология всплытия сопровождается шумами, спектр частот которых близок к естественным. Поэтому такое всплытие подводных лодок повышает также и их скрытность.

Разрушение льда посредством ИГВ может осуществляться как при движении водоизмещающих судов [2], так и амфибийных судов на воздушной подушке (СВП). В первом случае судно движется вдоль кромки льда или по каналу, возбуждая систему корабельных волн, которые затем трансформируются в ИГВ. При достижении судном определенной скорости амплитуда ИГВ возрастает до максимальных значений и ледяной покров соответствующей толщины начинает разрушаться на значительной площади (ширина разрушаемой полосы при движении средних ледоколов может достигать сотен метров [3]). Во втором случае СВП движется с резонансной скоростью по льду [4]. Возбуждаемая система ИГВ при определенной массе судна также приводит к разрушению ледяного покрова на большой площади.

Настоящая работа посвящена модельным исследованиям возбуждения подводными судами ИГВ амплитудой, достаточной для разрушения ледяного покрова реальной толщины при безопасных заглоблениях. Среди теоретических работ, посвященных этому вопросу, можно отметить исследования

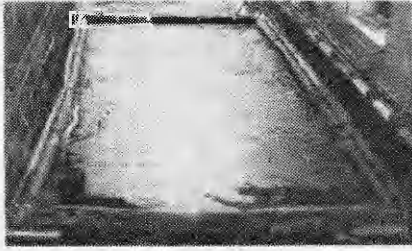


Рис. 1

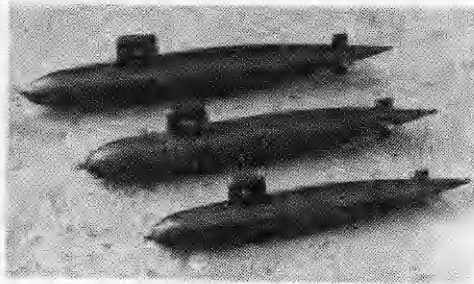


Рис. 2

Д.Е. Хейсина [5]. Беря за основу решение Н.Е. Кочина для свободной поверхности, он рассмотрел плоскую задачу о движении тела подо льдом. В [5] приведен качественный анализ характера возбуждаемых ИГВ. Теоретическое же решение задачи в трехмерной постановке весьма затруднительно.

Цель данной работы — исследование зависимости параметров ИГВ от скорости, заглубления, размеров судна, а также оценка ледоразрушающих возможностей судов путем пересчета данных ледокольных испытаний на натуру по полученным критериям.

Постановка и решение задачи. Воспользуемся возможностью моделирования ИГВ на плавающих упругих пленках [6]. В соответствии с этой методикой масштаб моделирования k определяется модулем упругости материала, имитирующего сплошной лед: $k = E_n/E_m$ (E_n, E_m — модули упругости натурального и модельного льда). Тогда в соответствии с теорией размерностей моделируемые и натурные параметры будут связаны соотношениями

$$\frac{w_n}{w_m} = \frac{\lambda_n}{\lambda_m} = \frac{h_n}{h_m} = \frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = k, \quad \frac{v_n}{v_m} = \frac{T_n}{T_m} = \sqrt{k},$$

$$\frac{D_n}{D_m} = k^3, \quad \frac{v_n}{\sqrt{gL_n}} = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}},$$

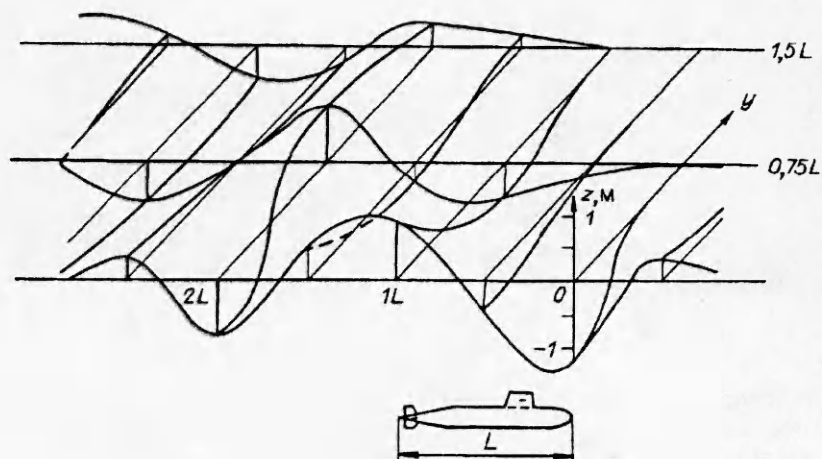
где w_n, w_m — прогиб льда; λ_n, λ_m — длина ИГВ; h_n, h_m — толщина льда; L_n, L_m, B_n, B_m — длина и ширина судна; v_n, v_m — скорость судна; T_n, T_m — период ИГВ; D_n, D_m — водоизмещение судна; g — ускорение силы тяжести.

В качестве модельного льда использовалась полимерная пленка (поливинилхлоридный пластикат), имитирующая лед толщиной $h_n = 0,2$ м. Модуль упругости пластиката E_m определяется экспериментально в зависимости от скорости деформации. Для создания положительной плавучести (плотность пластиката $\rho_m = 1400$ кг/м³) пленка по периметру крепилась к бандажу (рис. 1). Некоторое несоответствие коэффициента Пуассона μ_m и плотности ρ_m пластиката натурному льду, как видно из опытов по возбуждению ИГВ движущейся нагрузкой, практически не сказывается на параметрах волн.

Эксперименты проводились в опытном бассейне размерами $45 \times 4 \times 3$ м, оснащенный гравитационной буксировочной системой. Размеры модельного ледяного поля составляли 6×3 м. В качестве подводного судна взята обобщенная модель современных зарубежных подводных лодок с относительным удлинением $L/B = 8$ и коэффициентом общей полноты $\delta = 0,52$. Для оценки влияния масштабного эффекта на параметры ИГВ изготовлено три мо-



Рис. 3



Р и с. 4

дели (рис. 2) в масштабе $k = 1/200$, что соответствует водоизмещению натуральных судов: 3500, 6000 и 9000 т. Буксировки осуществлялись как под модельным льдом, так и в условиях чистой воды (рис. 3) при относительных заглублениях $h_0/L_m = 0,2-0,7$ (h_0 — глубина погружения модели). Параметры ИГВ (длина и амплитуда) регистрировались датчиком перемещения в различных точках модельного поля и записывались на двухкоординатном самописце. На рис. 4 показан общий характер деформаций модельного льда, пересчитанных на натуру (по вертикальной оси отложены прогибы льда, по горизонтальной — расстояние, кратное длине судна).

Систематические буксировки моделей позволили определить скорость, при которой амплитуда возбуждаемых ИГВ достигает максимальных значений. Значение этой критической (резонансной) скорости близко к теоретической величине критической фазовой скорости ИГВ для глубокой воды [5]:

$$v_p = \sqrt{\frac{Dg^2}{\rho_n h}}$$

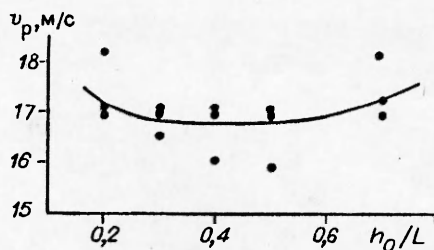
Здесь D — цилиндрическая жесткость ледяной пластины; ρ_n — плотность льда; h — толщина льда.

По результатам буксировок получена зависимость v от заглубления (рис. 5). Среднее значение v_p составило около 17 м/с, а теоретическое для $h = 0,2$ м — 15,8 м/с. При этом размеры моделей на v не сказались. Из рис. 6, где представлены профили ИГВ при различных скоростях модели (по оси Oz отложены деформации льда для сечения $y = 0$), видно, что по мере приближения скорости к v_p наблюдается значительное увеличение амплитуды ИГВ. При неизменной длине волны это приводит к росту кривизны профиля ИГВ и соответственно изгибных напряжений. Полное затухание волн наблюдается на расстоянии 3—4 длин ИГВ.

Сопоставляя параметры гравитационных волн на свободной поверхности и ИГВ при одинаковых заглублениях на резонансных скоростях модели, приходим к выводу, что наличие льда приводит к своеобразному стеснению объема жидкости.

Так, амплитуда ИГВ при равных условиях на 20—30 % больше амплитуды гравитационных волн. Также наблюдается рост сопротивления при заходе модели под поле льда.

На основании полученных данных оценим ледоразрушающую способность ИГВ в зависимости от заглубления при резонансных скоростях



Р и с. 5

движения. В качестве критерия полного разрушения льда возьмем теоретический уровень изгибных напряжений, рассчитанных для случаев разрушения льда ИГВ [7]. По результатам обработки многочисленных опытов по разрушению натурального льда ИГВ этот уровень составляет $2,1 \sigma_{и}$ ($\sigma_{и}$ — предел прочности льда на изгиб). Целесообразность такого подхода обоснована в [7].

Перейдем от полученных деформаций модельного поля к изгибным напряжениям. Поскольку вблизи модели профиль ИГВ близок к плоским синусоидальным волнам (см. рис. 3), то, допуская ошибку в безопасную сторону (занижаем уровень напряжений), величину изгибных напряжений можно оценить по формуле

$$\sigma_x = \frac{EAh}{2(1-\mu')} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \sin \frac{2\pi x}{\lambda},$$

где E — модуль упругости льда; A — амплитуда ИГВ; λ — длина ИГВ; x — текущая координата.

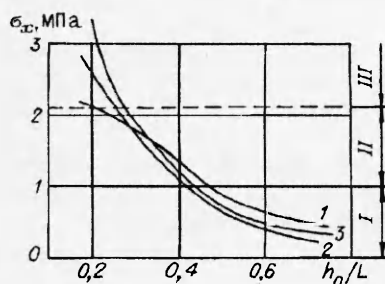


Рис. 7

Результаты расчетов, представленные на рис. 7, показывают, что суда одного относительного удлинения ($L/B = 8$) и разного водоизмещения создают практически одинаковый уровень напряжений в сплошном льду при $h_0/L = 0,3$. Полного разрушения льда в соответствии с принятым критерием разрушения можно ожидать при относительном погружении $h_0/L = 0,2-0,3$ (область III), а образование трещин в сплошном льду возможно до $h_0/L = 0,4-0,5$ (область II) при резонансной скорости судна $v_p = 17$ м/с и принятом пределе прочности льда на изгиб $\sigma_{и} = 1$ МПа.

Выполненная работа позволяет прийти к заключению, что резонансный метод разрушения ледяного покрова может быть реализован подводными судами с целью всплытия в сплошном льду при безопасных заглублениях корпуса. Данная методика может быть использована для прогнозирования ледокольных возможностей подводных судов и разработки рекомендаций при осуществлении процесса всплытия в сплошном льду.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. 1233401 СССР. Многокорпусное подводное судно/В.М. Козин. — Открытия и изобретения. — 1989. — № 19.
2. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. — Л.: Судостроение, 1980.
3. А.С.1605471 СССР. Способ разрушения ледяного покрова/В.М. Козин. — Открытия и изобретения. — 1990. — № 41.
4. Зуев В.А., Козин В.М. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова. — Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1988.
5. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. — Л.: Гидрометеиздат, 1967.
6. Козин В.М. Моделирование ИГВ в сплошном ледяном покрове // Теория и прочность ледокольного корабля. — Горький: Изд-во ГПИ, 1982.
7. Kozin V.M. The estimate of ice breaking capacity by a moving load // 7th Intern. Offshore Mechanics Conf., USA, 1988: Proc.

г. Комсомольск-на-Амуре

Поступила 17/III 1993 г.,
в окончательном варианте — 30/IV 1993 г.

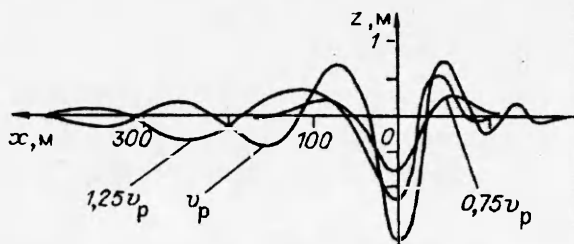


Рис. 6