DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-5>
УДК 629.124.8.039(07)

В.М. Козин

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор по кафедре кораблестроения, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, AuthorID: 151655, SPIN: 1265-7970, ResearcherID S-6053-2016, ScopusID:8548383800, <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>, e-mail: kozinvictor@rambler.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Металлургов ул., 1, Комсомольск-на-Амуре, Россия, 681005

Зависимость суммарной мощности энергетической установки ледокольного судна на воздушной подушке от толщины ледяного покрова, разрушаемого резонансным методом

Аннотация: Отмечены особенности эксплуатации амфибийных судов на воздушной подушке (СВП), совмещающих транспортные функции с ледокольными при разрушении ледяного покрова резонансным методом, т.е. путем возбуждения во льду резонансных изгибно-гравитационных волн. На основании ранее полученных автором зависимостей массы, площади и давления в воздушной подушке судна, достаточных для разрушения ледяного покрова, а также известных работ по проектированию СВП рассчитана зависимость суммарной мощности судна от толщины разрушаемого льда. На ранних стадиях проектирования выполненная нами работа позволит определить минимальные энергозатраты СВП, достаточные для разрушения ледяного покрова резонансным методом, т.е. оценить эффективность использования СВП для решения ледотехнических задач.

Ключевые слова: судно на воздушной подушке, ледяной покров, разрушение, резонансный метод, энергетическая установка, суммарная мощность.

Введение

Необходимость в использовании судов на воздушной подушке (СВП) для разрушения ледяного покрова резонансным методом (рис. 1), т.е. при их движении по льду со скоростью резонансных изгибно-гравитационных волн [1], возникает в тех случаях, когда с помощью традиционных ледокольных средств затруднительно, а иногда и невозможно решить ряд ледотехнических задач [4]. К таковым можно отнести: разрушение ледяного покрова на мелководье, т.е. когда глубина акватории оказывается недоступной для ледоколов из-за их осадки; разрушение заторов и зажоров во время весенних ледоходов с целью предотвращения разрушительных наводнений; быстрое разрушение льда на больших площадях при обслуживании ГЭС для уменьшения подпора воды в нижнем бьефе русла реки с целью повышения уровня выработки электроэнергии и вскрытие ледяного покрова водохранилищ и заливов рек с целью более раннего открытия навигации на внутренних водных путях и пр. [6]. В работе решается задача по определению суммарной мощности СВП, достаточной для разрушения ледяного покрова резонансным методом, т.е. для возможности использования для этой

цели существующих судов при заданной толщине льда, или при проектировании ЧВП, совмещающих ледокольные функции.

Особенности эксплуатации СВП в ледовых условиях

Эксплуатация амфибийных СВП в ледовых условиях (рис. 1) в отличие от обычной эксплуатации имеет свои особенности, влияющие на мощность их энергетических установок. Несмотря на возможность использования обычных СВП в качестве ледоразрушающего средства (СВПЛ), для более успешной их эксплуатации к вновь проектируемым судам предъявляют дополнительные требования к конструкции и оборудованию. Для речных условий эти требования менее жесткие, чем для условий Арктики [5]. Общими для арктических и речных условий являются требования, предъявляемые к конструкции СВПЛ. Движение над заторошенными участками ледяного покрова требует большей высоты гибкого ограждения (ГО) [2, 9]. В наиболее вероятных местах контакта ГО со льдом необходимо утолщение стенок ГО. Наиболее целесообразна пальцеобразная конструкция ГО, обеспечивающая быструю смену поврежденных элементов и их большую податливость при контакте с водой и препятствиями. Материал ГО наряду с общепринятыми требованиями [9] должен удовлетворять и требованиям специальным: сохранение эластичности, хорошей износостойкости и прочности при отрицательных температурах.

Рис. 1. Разрушение ледяного покрова СВП «Мурена» резонансным методом.

Более суровые условия Арктики и высокие скорости движения требуют установки на судах эффективной и точной системы обнаружения препятствий. Работа в паковом льду с большим количеством торосов требует улучшенной по сравнению с существующими судами маневренности. Большее количество маневров требует дополнительного расхода топлива [4]. При работе в ледовых условиях СВПЛ должны иметь повышенную тяговую мощность по сравнению с судами, работающими в условиях чистой воды. Как показывают исследования [11], на больших СВП, более чувствительных к массе механизмов, целесообразна установка газотурбинных двигателей. Поэтому, по-видимому, потребуются корректировка существующих уравнений масс, так как при работе в зимних условиях для жилых и служебных помещений необходимы большие площади. При этом особенности СВПЛ, способных работать в ледовых условиях, не должны ограничивать область их использования в любой период навигации.

СВП нового типа, создаваемые для народного хозяйства, должны обладать высокими эксплуатационными качествами и надежностью в самых разнообразных природных и климатических условиях. Конструкция перспективных СВП путем несложной модификации основного варианта должна обеспечивать возможность их многоцелевого использования. Вы-

полнение этого требования особенно важно для легких и средних СВП, предназначенных для обширных малоосвоенных районов Севера и Северо-Востока России со слабо развитой дорожной сетью, где обычные виды транспорта, за исключением воздушного, практически неприменимы. Для эксплуатации в малонаселенных районах северных широт, очевидно, наиболее удобны амфибийные СВП, представляющие по своему архитектурно-конструктивному типу суда-площадки. Грузовая палуба таких судов должна проектироваться с учетом горизонтального способа погрузки-выгрузки, что отвечает требованию перевозки грузов широкой номенклатуры: контейнеров; поддонов; пакетов; бочек; колесных, гусеничных машин; различного оборудования и т.д. При проектировании модульных корпусов СВП необходимо предусматривать и возможность создания на их базе несамходных лихтеров на воздушной подушке.

Зависимости для определения мощности движительного и подъемного комплексов СВП

Удовлетворить все вышеперечисленные требования к СВПЛ возможно, если обеспечить им достаточную энерговооруженность. На начальной стадии проектирования полную мощность энергетической установки судна можно считать состоящей из мощности, необходимой для его движения с заданной скоростью $N_{ДВ}$, и мощности для создания воздушной подушки (ВП) $N_{ВП}$. Мощность $N_{ДВ}$ может быть определена по формуле

$$N_{ДВ} = \frac{R_n v}{\eta_{ДВ}}, \quad (1)$$

где R_n – полное сопротивление движению судна для заданного режима; v – скорость движения судна; $\eta_{ДВ}$ – коэффициент полезного действия движителя, выбираемый в соответствии с рекомендациями [3].

В общем случае полное сопротивление можно представить в виде суммы [6]

$$R_{\Pi} = R_{возд} + R_{имп} + R_p + R_{\epsilon} + R_{\phi} + R_{тр} + R_{бр}, \quad (2)$$

где $R_{возд}$ – воздушное сопротивление; $R_{имп}$ – импульсное сопротивление; R_p – сопротивление, вызванное силой реакции воздушных струй, вытекающих из ВП; R_{ϵ} – волновое сопротивление; R_{ϕ} – сопротивление формы; $R_{тр}$ – сопротивление трения; $R_{бр}$ – брызговое сопротивление.

Для традиционных СВП полное сопротивление и, соответственно, необходимую суммарную мощность определяют по известным зависимостям [3, 6, 10, 12]. При этом следует отметить, что остаточное сопротивление ГО, включающее брызговое сопротивление, сопротивление формы и реактивную тягу воздушных струй, становится значительным при больших скоростях движения судна [9]. Расчетным режимом при применении РМРЛ (резонансный метод разрушения ледяного покрова) будет движение СВПЛ со скоростью, соответствующей наибольшему волновому сопротивлению судна, т.е. при небольших числах F_r [4]. При таких скоростях воздушное, импульсное и остаточное сопротивления незначительны. Кроме того, движение судна по льду в отношении R_{ϕ} и $R_{бр}$ равносильно движению над твердым экраном [8], так как окончательное разрушение льда при РМРЛ происходит за судном. Поэтому эти составляющие из уравнения (2) можно исключить. Отсутствие замыва ГО при движении судна в режиме разрушения сплошного льда делает незначительной и величину $R_{тр}$. Пренебрежение в расчетах этими составляющими, дающее погрешность в большую сторону (в сторону уменьшения мощности), компенсировалось выбором завышенных прочностных характеристик льда (принимался верхний предел значений в диапазоне разброса их

величин). Определяющую же роль в общем балансе сопротивления СВПЛ при разрушении ледяного покрова резонансным методом будет играть волновая составляющая. Аналогичны заключения и для обычных СВП, движущихся по чистой воде. Это следует из зависимостей работы [8], в которой также отмечается, что выбор мощности механической установки СВП во многом определяется величиной тяги, необходимой для преодоления «горба» волнового сопротивления [12]. Поскольку режим движения, соответствующий $R_g^{\max}$, является основным для СВПЛ, то можно записать

$$R_n \cong \frac{c_g^{\max} P_{ВП}^2 B_{ВП}}{\rho_g q}, \quad (3)$$

где $c_g^{\max}$ – максимальное значение коэффициента волнового сопротивления судна; q – ускорение силы тяжести; ρ_g – плотность воды; $P_{ВП}$ – давление в воздушной подушке; $B_{ВП}$ – ширина воздушной подушки.

Откуда

$$N_{ДВ} = \frac{c_g^{\max} P_{ВП}^2 B_{ВП} V}{\rho_g q \eta_{ог}}. \quad (4)$$

Битый лед на поверхности воды, как показали проведенные эксперименты [2], слабо влияет на параметры гравитационных волн вблизи судна. Поэтому при определении $c_g^{\max}$ с ошибкой в сторону увеличения R_g (битый лед уменьшает амплитуду возбуждаемых волн), т.е. в безопасную сторону, можно воспользоваться графическими зависимостями $c_g = f(F_r, \lambda_{ВП})$ для чистой воды, приведенными в [10].

Величину $N_{ВП}$ с достаточной для начальной стадии проектирования степенью точности можно определить по формуле [12]

$$N_{ВП} = \frac{QP_p}{\eta_g}, \quad (5)$$

где Q – объемный расход воздуха в ВП в режиме движения на волнении; $P_p = 1,3P_{ВП}$ – требуемый полный напор; η_g – КПД нагнетательной установки (по данным работы [9] $\eta_g = 0,50–0,65$). Его значение определяется передаточным отношением и типом редукторов, количеством и типом креплений и подшипников, протяженностью линий вала и пр. [3]. Суммарные потери мощности двигателя, связанные с прохождением воздуха через воздухопроточные шахты, каналы, фильтры, различные гидравлические сопротивления, функционирования маслорадиаторов и т.п., могут составлять около 10% [3].

Необходимый объемный расход воздуха при сопловой схеме образования ВП можно определить по формуле [12]

$$Q = K_{ex} A_e \sqrt{P_{ВП}}, \quad (6)$$

где: K_{ex} – коэффициент расхода воздуха; $A_e = h_0 a_e$ – площадь истечения воздуха из ВП; h_0 – воздушный зазор; a_e – периметр ГО. Откуда

$$N_{ВП} = \frac{K_{ex} A_e \sqrt{P_{ВП} P_p}}{\eta_g}. \quad (7)$$

Рассчитанные по зависимостям (4) и (7) мощности в сумме позволяют приближенно определить необходимо длительную мощность энергетической установки СВПЛ. Так как длительная мощность газотурбинных двигателей составляет 75–80% от полной мощности [12], то полная мощность энергетической установки СВПЛ будет равна

$$N_n = 1,25(N_{дв} + N_{вп}). \quad (8)$$

Определение суммарной мощности СВПЛ

Расчеты по формуле (8) выполнены для СВПЛ, имеющих параметры, обеспечивающие разрушение ледяного покрова заданной толщины резонансным методом. На рисунках 2 и 3 приведены эти зависимости, взятые из [7].

Рис. 2. Зависимость массы СВПЛ (M_c) от толщины разрушаемого ледяного покрова и давления в ВП [7].

Рис. 3. Зависимость толщины разрушаемого льда от давления и площади ВП ($S_{вп}$) [7].

Результаты выполненных расчетов для случая: удлинения ВП $\lambda_{вп} = 2$; $\eta_e = 0,6$; $h_q = 0,15$ м; $H = \infty$; $h_q/t_j = 2$ (t_j – толщина сопла); $K_{ex} = 0,48$ м²/н^{0,5} [3] сведены в таблицы 1 и 2, а также представлены на рис. 4.

Таблица 1

Расчет мощности СВПЛ, необходимой для движения судна

$P_{вп}$, кПа	h , м	M_c , т (рис. 2)	$S_{вп}$, м ² (рис. 3)	$B_{вп}$, м	Число F_r , соответствующее R_g^{max}	c^{max} , [3]	$\eta_{ДВ}$, [10]	НДВ, кВт (ф.4)
2,0	0,2	115	60	5,5	0,63	2,41	0,10	330
	0,4	500	250	11,1			0,14	703
	0,6	1270	630	17,7			0,17	1170
	0,8	2500	1260	24,8			0,20	1650
	1,0	4400	2200	33,2			0,25	2210
4,0	0,2	115	30	3,9	0,63	2,41	0,09	870
	0,4	440	110	7,4			0,13	1670
	0,6	1040	260	11,4			0,15	2760
	0,8	1900	475	15,3			0,17	3780
	1,0	3000	750	19,4			0,18	5070
6,0	0,2	90	15	2,7	0,63	2,41	0,08	1350
	0,4	360	60	5,5			0,11	2910
	0,6	900	150	8,7			0,14	4420
	0,8	1590	265	11,5			0,15	6250
	1,0	2430	405	14,3			0,17	7660

Таблица 2

Расчет полной мощности энергетической установки СВПЛ

h , м	$P_{ВП}$, кПа	$S_{ВП}$, м ² (рис. 3)	a_e , м	$N_{ВП}$, кВт	$N_{ДВ}$, кВт	$N_{ВП} + N_{ДВ}$, кВт	N_n , кВт
0,2	2,0	60	32,8	458	330	788	985
	4,0	30	23,2	915	870	1780	2230
	6,0	15	16,4	1190	1350	2540	3170
0,4	2,0	250	67,0	935	703	1640	2050
	4,0	110	44,6	1760	1670	3430	4280
	6,0	60	32,8	2380	2910	5290	6610
0,6	2,0	635	106,8	1490	1170	2660	3330
	4,0	260	68,4	2700	2760	5460	6820
	6,0	150	51,9	3760	4420	8180	10230
0,8	2,0	1250	149,9	2090	1650	3740	4680
	4,0	475	92,4	3640	3780	7430	9280
	6,0	265	69,0	5000	6250	11250	14100
1,0	2,0	2200	198,9	2780	2210	4990	6240
	4,0	750	116,0	4580	5070	9650	12000
	6,0	405	85,3	6180	7660	13840	17300

Сопоставление полученных результатов с полной мощностью энергетических установок СВПЛ с мощностью существующих СВП с аналогичными главными размерениями показали их заниженные значения. Это означает, что для разрушения ледяного покрова резонансным методом энерговооруженность существующих СВП вполне достаточна. Приведенные расчеты выполнены для бесконечно глубокой воды. На мелководье происходит увеличение волнового сопротивления и смещение его максимума в сторону меньших значений скорости. На практике влияние мелководья приближенно можно учесть путем увеличения «горба» волнового сопротивления в 1,5–2 раза, что позволяет учитывать и уменьшение тяги двигателей с понижением скорости СВП [10].

Рис. 4. Зависимость суммарной мощности СВПЛ от толщины льда и давления в ВП.

Заключение

Выполненные расчеты позволяют на ранних стадиях проектирования оценить минимальные энергозатраты СВПЛ, достаточные для разрушения ледяного покрова заданной толщины. Это, в свою очередь, позволит предварительно оценить эффективность использования СВП для разрушения ледяного покрова резонансным методом с целью решения различных ледотехнических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. 360 с.
2. Грамузов Е.М., Москвичева Ю.А., Зуева Е.А. Техничко-экономический анализ разрушения ледяного покрова с использованием технологий на воздушной подушке // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16710> (дата обращения: 03.08.2019).
3. Демешко Г.Ф. Проектирование судов: амфибийные суда на воздушной подушке: в 2 кн. СПб.: Судостроение, 1992. Кн. 1. 269 с.; кн. 2. 329 с.
4. Зуев В.А., Москвичева Ю.А. Прогнозирование сопротивления окружающей среды при проектировании ледокольных платформ на воздушной подушке // Судостроение. 2017. № 4. С. 11–13.
5. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов. СПб.: Судостроение, 2013. 512 с.
6. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2013. 504 с.
7. Козин В.М., Земляк В.Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН: ПГУ им. Шолом-Алейхема: АМГПУ, 2013. 250 с.
8. Москвичева Ю.А., Ларин А.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при движении над ним ледокольных платформ на воздушной подушке // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2 (ч. 2). URL: <http://science-education.-ru/ru/issue/view?id=129> (дата обращения: 01.03.2019).
9. Москвичева Ю.А. Вопросы проектирования платформ на воздушной подушке // Транспортные системы. 2016. № 1. С. 44–49.
10. Титов И.А., Егоров И.Т., Дробленков В.Ф. Ходкость быстроходных судов. Л.: Судостроение, 1979. 256 с.
11. Gold L.W. Use of Ice Covers for Transportation. Canadian Geotechnical J. 1971(8):170–181.
12. Yun L., Bliault A. Theory and Design of Air Cushion Craft. London, 2000, 632 p.
13. URL: <http://bookre.org/reader?file=466651> – 31.05.2019.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-5>

Kozin V.

VICTOR KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Shipbuilding, Chief Researcher of the Laboratory for Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Researcher ID S-6053-2016, Scopus ID: 8548383800, <https://orcid.org/0000-0002-2673-469X>, e-mail: kozinvictor@rambler.ru
Institute of Machine Science and Metallurgy, FEB RAS
1, Metallurgov St., Komsomolsk-on-Amur, Russia, 681005

The dependence of the integral capacity of the hovercraft icebreaker power plant on the thickness of the ice cover destroyed by the resonance method

Abstract: The article features the specifics of amphibious hovercraft (SVP) operation, combining icebreaking functions in the destruction of the ice cover by the resonance method, i.e. by exciting resonant flexural-gravity waves in ice. Based on the previously obtained dependencies of mass, area and pressure in the air cushion of the vessel, sufficient for the destruction of the ice cover, as well as well-known works on designing SVP, the dependence of the total capacity of the vessel on the thickness of the ice to be destroyed was calculated. It is concluded that in the early stages of the design, the results of our research will make it possible to determine the minimum energy consumption of the SVP, sufficient to destroy the ice cover by the resonant method, and evaluate the effectiveness of using SVP for solving ice engineering problems.

Keywords: hovercraft, ice cover, destruction, resonance method, power plant, total power.

REFERENCES

1. Bukatov A.E. Waves in the sea with floating ice cover. Sevastopol, MGI, 2017, 360 p.
2. Gramuzov E.M., Moskvicheva Yu.A., Zueva E.A. Feasibility study of ice sheet destruction using hovercraft technologies. Modern problems of science and education. 2014;6. URL: <http://www.science-education.ru/en/article/view?id=16710> – 08/03/2019.
3. Demeshko G.F. Ship design: amphibious hovercraft: in 2 books. SPb., Shipbuilding, 1992, Book 1, 269 p., Book 2, 329 p.
4. Zuev V.A., Moskvicheva Yu.A. Prediction of environmental resistance in the design of icebreakers hovercraft. Shipbuilding. 2017;4:11–13.
5. Ionov B.P., Gramuzov E.M., Zuev V.A. Design of icebreakers. SPb., Shipbuilding, 2013, 512 p.
6. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ship ice speed. SPb., Shipbuilding, 2013, 504 p.
7. Kozin V.M., Zemlyak V.L. The physical basis of ice cover destruction by the resonance method. Komsomolsk-on-Amur, IMiM FEB RAS, PSU named after Sholem Aleichem; AMGPGU, 2013, 250 p.
8. Moskvicheva Yu.A., Larin A.G. Assessment of the stress-strain state of the ice cover during movement of ice cushioned ice-breaking platforms above it. Modern problems of science and education. 2015;2 (part 2). URL: <http://science-education.ru/en/issue/view?id=129>. – 03/01/2019.
9. Moskvicheva Yu.A. Design issues for hovercraft platforms. Transport systems. 2016;1:44–49.
10. Titov I.A., Egorov I.T., Droblenkov V.F. Speed of high-speed vessels. L., Shipbuilding, 1979, 256 p.
11. Gold L.W. Use of Ice Covers for Transportation. Canadian Geotechnical J. 1971(8):170–181.
12. Yun L., Bliault A. Theory and Design of Air Cushion Craft. London, 2000, 632 p. URL: <http://bookre.org/reader?file=466651>. – 31.05.2019.