

Г.И. Каневский¹, А.М. Клубничкин¹, А.В. Рыжков², К.Е. Сазонов¹

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² ПАО «ЦКБ «Айсберг», Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕЛКОВОДЬЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ ЛЕДОКОЛА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является влияние мелководья на параметры ледовой ходкости ледокола.

Материалы и методы. Использованы данные модельных испытаний перспективного ледокола в гидродинамическом и ледовом бассейнах, выполненные в условиях глубокой воды и мелководья с применением нового метода расчета ледовой ходкости многовального ледокола.

Основные результаты. Разработан метод расчета ледовой ходкости многовального ледокола. Получены данные по влиянию мелководья на параметры ледовой ходкости ледоколов и судов ледового плавания, движущихся во льдах по мелководным участкам полярных акваторий.

Заключение. Новый метод расчета параметров ледовой ходкости многовального ледокола базируется на введении швартовочной системы коэффициентов взаимодействия движителей и корпуса, без которой подобный расчет был невозможен. Метод позволяет рассчитать параметры, характеризующие движение ледокола при условии отсутствия взаимодействия гребных винтов со льдом, и оценить ледовое сопротивление в натуральных условиях. В случае же интенсивного взаимодействия гребных винтов ледокола со льдом сравнение натуральных и модельных данных с расчетными значениями дает неоценимую информацию для изучения влияния таких взаимодействий на параметры движения ледокола. Данные расчетов ледовой ходкости ледокола на глубокой воде и мелководье позволяют спрогнозировать основные параметры его движения и принять меры для преодоления опасной ситуации.

Ключевые слова: ледокол, мелководье, коэффициенты взаимодействия, ледовая ходкость.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Рыжков А.В., Сазонов К.Е. Оценка влияния мелководья на параметры ледовой ходкости ледокола. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 3(385): 9–17.

УДК 629.651.5:629.5.016

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-9-17

G.I. Kanevsky¹, A.M. Klubnichkin¹, A.V. Ryzhkov², K.E. Sazonov¹

¹ Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

² JSC CDB Iceberg, St. Petersburg, Russia

ESTIMATION OF SHALLOW-WATER EFFECT ON ICEBREAKER PROPULSION PERFORMANCE IN ICE

Object and purpose of research. The object of this study is to investigate the shallow-water effect on icebreaker propulsion performance in ice.

Materials and methods. Model test data obtained in hydrodynamic and ice basins in deep- and shallow-water conditions for an icebreaker of advanced design are handled using a new method of propulsion performance prediction for a multi-shaft icebreaker.

Main results. A method for prediction of propulsion performance of a multi-shaft icebreaker in ice was developed. Data were obtained regarding shallow-water effects on propulsion performance of icebreakers and ice-going vessels operating in ice-infested polar shallow waters.

Conclusion. The new method for prediction of propulsion performance in ice is enabled by introduction of a so-called “bollard pull” system of hull/propeller interaction coefficients. This method makes it possible to estimate parameters characterizing icebreaker propulsion in absence of interaction between ice cover and propellers, as well as to estimate full-scale ship ice resistance. In case of heavy interaction between icebreaker’s propellers and ice the comparison of full-scale and model data provides valuable information for better understanding of how interaction parameters influence the icebreaker performance. Estimations of icebreaker propulsion in ice under deep- and shallow-water conditions enable prediction of main parameters of ship motion so that proper measures could be taken to avoid hazardous situations.

Key words: icebreaker, shallow water, interaction coefficients, propulsion performance in ice.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Ryzhkov A.V., Sazonov K.E. Estimation of shallow-water effect on icebreaker propulsion performance in ice. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 3(385): 9–17 (in Russian).

UDC 629.651.5:629.5.016

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-3-385-9-17

Введение

Introduction

Особенностью морей российской Арктики является их относительная мелководность [1]. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения в процессе проектирования ледоколов и судов активного ледового плавания. В настоящее время ведется строительство нового поколения атомных ледоколов пр. 22220, предназначенных для эксплуатации как в условиях глубокой воды, так и на мелководье [2]. В ходе проектирования этого ледокола был выполнен большой объем экспериментальных исследований в гидродинамическом и ледовом бассейнах, включая проведение испытаний в условиях мелководья [3]. Тем не менее, выполнение расчетов его ледовой ходкости, тем более при движении во льдах на мелкой воде, было практически невозможно. Внедрение в практику выполнения расчетов ходкости новой альтернативной системы коэффициентов взаимодействия [4–6], а также положительный опыт расчетов показателей ледовой ходкости ледоколов в условиях глубокой воды [7, 8], позволили выполнить анализ ходкости ледокола на мелководье в ледовых условиях.

Особенности движения ледокола на мелководье

Specifics of icebreaker sailing in shallow water

При движении любого судна на чистой воде на мелководье происходит изменение в характере обтекания корпуса водой, а также в условиях работы его движителей. Эти изменения довольно хорошо изучены и изложены в монографиях (например, [9]) и справочных руководствах [10].

Наличие ледяного покрова приводит к возникновению дополнительных изменений в картине обтекания. Основное отличие от условий движения ледокола на чистой глубокой воде, связанное с наличием ледового поля, заключается в резком снижении скорости движения корабля при потреблении им полной мощности. Такой характер движения связан с тем, что ледокол при движении помимо сопротивления воды вынужден преодолевать значительное сопротивление ледовой среды. Указанная особенность обуславливает постоянную работу его движительного комплекса на режимах близких к швартовому. Такие режимы обычно не рассматриваются при расчетах ходкости на чистой воде, т.к. традиционные расчетные схемы в этих условиях не работают. Наличие мелководья вносит дополнительные осложнения.

Кроме этого, определенные трудности при определении параметров ледовой ходкости ледокола создают наличие «ледовой рубашки» (расположенные на подводной части корпуса куски приотпленного льда) и возможное взаимодействие движителей с кусками льда, частота взаимодействия с которыми увеличивается на мелководье. Однако в первом приближении для выяснения характера влияния мелководья при оценке среднеинтегральных показателей ходкости этими факторами можно пренебречь.

Режимы работы движителей в ледовом поле характеризуются малыми значениями поступи J , лежащими в диапазоне от 0 до 0,3. Величина коэффициента нагрузки движителей по полезному упору K_{DE} тоже оказывается малой, $K_{DE} = 0–0,5$. Для таких условий движения традиционная схема расчета ходкости, основанная на применении классической системы коэффициентов взаимодействия гребного винта с корпусом, не работает. Дело в том, что на

указанных режимах величина коэффициента попутного потока w_T становится отрицательной (рис. 1), и ее невозможно использовать для расчета ледовой ходкости.

Данные рис. 1 убедительно показывают, что в условиях мелководья наблюдается более ранний переход значений попутного потока в отрицательную область по сравнению с движением на глубокой воде, причем этот переход происходит более интенсивно.

Имеются отличия и в ледовом сопротивлении ледокола, движущегося на мелководье, от ледового сопротивления на глубокой воде. Необходимо отметить, что эти различия наблюдаются только при движении ледокола на предельном мелководье, когда зазор между днищем и дном водоема примерно равен толщине преодолеваемого льда [11]. В этом случае ледовое сопротивление ледокола может существенно возрасти. Анализ факторов, приводящих к возрастанию ледового сопротивления, содержится в работах [12, 13].

Прогноз ледового сопротивления ледокола пр. 22220, используемый в дальнейших расчетах, был получен на основании результатов модельных испытаний в ледовом бассейне на глубокой воде и на мелководье.

При проведении модельных испытаний осадка ледокола пр. 22220 составляла 10,5 м при движении на глубокой воде, а при движении на мелкой воде осадка уменьшена и составляла 8,5 м. Глубина воды в условиях мелководья была принята равной 11 м. Таким образом, при движении ледокола в указанных условиях льдины могли попадать в зазор между корпусом и дном. В связи с этим сопротивление ледокола в ледовом поле толщиной 2,6 м на мелководье заметно превышает величину, полученную на глубокой воде.

Метод расчета ледовой ходкости многовального ледокола

Method for prediction of propulsion performance in ice for a multi-shaft icebreaker

Термин «ледовая ходкость» здесь и далее означает ходовые качества ледокола при его движении в ледовом поле. На современном этапе развития при разработке метода расчета ледовой ходкости ледокола используются следующие гипотезы:

- кривые действия гребных винтов при движении ледокола в ледовом поле совпадают с данными, полученными для чистой воды;

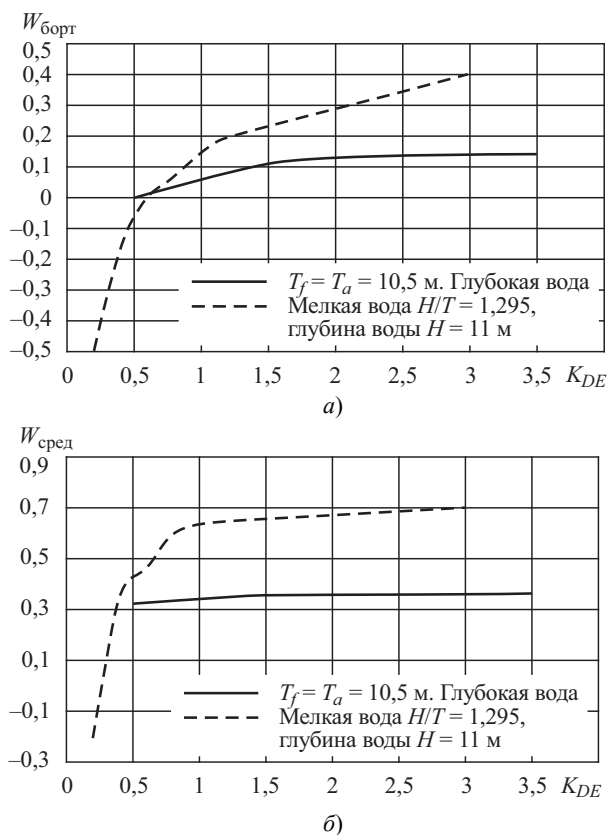


Рис. 1. Зависимость коэффициента попутного потока бортовых $W_{\text{борт}}$ (а) и среднего $W_{\text{сред}}$ (б) гребных винтов ледокола пр. 22220 от коэффициента нагрузки K_{DE} . Передний ход

Fig. 1. Icebreaker Pr. 22220: Wake fractions of wing propellers $W_{\text{борт}}$ (a) and middle propeller $W_{\text{сред}}$ (b) versus loading coefficient K_{DE} . Forward speed

- коэффициенты взаимодействия (по швартовой системе) гребных винтов с корпусом при движении ледокола в ледовом поле совпадают с данными, полученными для чистой воды;
- буксировочное сопротивление ледокола при движении в ледовом поле равно сумме ледового и гидродинамического сопротивлений.

Эти гипотезы можно считать справедливыми только в первом приближении с учетом сказанного выше.

Анализируя принятые гипотезы, можно отметить следующее:

- при разделении движителей и корпуса ледокола естественно рассматривать гребные винты, работающие в свободной воде. Любые другие условия, например, работа с учетом взаимодействия

с льдинами из ледовой рубашки, вносят значительные неопределенности, которые весьма сложно преодолеть;

- коэффициенты взаимодействия движителей с корпусом ледокола определяются по результатам самоходных испытаний на чистой воде в связи с отсутствием в настоящее время поправок на влияние на коэффициенты взаимодействия ледовой рубашки;
- существующая методика определения буксировочного сопротивления, принятая в ледовом бассейне, позволяет определить только сумму ледового и гидродинамического сопротивлений. Кроме того, необходимо иметь в виду, что гидродинамическое сопротивление ледокола, движущегося в ледовом поле, при одной и той же скорости движения отличается от такового на чистой воде. В данной работе для буксировочного сопротивления используется символ R_{Σ} .

Дополнительные трудности, которые приходится преодолевать при расчетах ледовой ходкости ледокола пр. 22220 и других современных ледоколов, связаны с наличием сложных многовальных движительных систем ледоколов. Ниже приводится метод расчета ледовой ходкости многовального ледокола, движущегося в ледовом поле, целью которого является определение частоты вращения для различных типов гребных винтов n_i и достижимой скорости хода V_{Sc} .

Исходными данными расчета ходкости многовального ледокола являются:

1. Зависимость буксировочного сопротивления воды и льда R_{Σ} , кН от скорости хода V_S :

$$R_{\Sigma} = R_T(V_S) + R_{ICE}(V_S), \text{ кН.}$$

2. Гидродинамические характеристики гребных винтов (винто-рулевых колонок), т.е. их кривые действия в «свободной воде»:

$$K_{To_i} = K_{To_i}(J_{o_i});$$

$$K_{Qo_i} = K_{Qo_i}(J_{o_i}).$$

3. Количество гребных винтов каждого типа:

$$Z_{P1}, Z_{P2} \dots Z_{Pi} \dots Z_{PNi}; Z_p = \sum_{i=1}^{N_i} Z_{Pi},$$

где Z_p – общее количество гребных винтов.

4. Диаметры гребных винтов каждого типа:

$$D_1, D_2 \dots D_i \dots D_{Ni}, \text{ м.}$$

5. Располагаемая мощность на фланце двигателей:

$$P_{B1}, P_{B2} \dots P_{Bi} \dots P_{BNi}, \text{ кВт.}$$

6. КПД электромеханической передачи:

$$\eta_{sh1}, \eta_{sh2} \dots \eta_{shi} \dots \eta_{shNi}.$$

7. Коэффициенты взаимодействия гребных винтов с корпусом судна по швартовой системе [4, 5]:

- коэффициент засасывания $t = t(K_{DE})$;

$$i_{TBi} = i_{TBi}(K_{DE});$$

- коэффициенты влияния корпуса на момент $i_{QBi} = i_{QBi}(K_{DE})$.

Расчет характеристик ледовой ходкости осуществляется с помощью алгоритма, описанного ниже.

1. Задаётся ряд значений скорости хода ледокола

$$V_{S1}, V_{S2} \dots V_{Sj} \dots V_{SNj}, \text{ уз.}$$

2. По величинам V_{Sj} определяется скорость

$$V_j = V_{Sj} \cdot 0,51444, \text{ м/с.}$$

3. Для каждой скорости вычисляется величина коэффициента нагрузки движителя по полезной тяге, в качестве которой берется буксировочное сопротивление ледокола во льдах

$$K_{DEj} = V_j \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} (D_i^2 \cdot Z_{Pi})} : \sqrt{\frac{T_{Ej}}{\rho}},$$

где $T_{Ej} = R_{\Sigma}(V_S)$.

4. Далее вычисляются значения коэффициентов взаимодействия по швартовой схеме

$$t_j = t(K_{DEj});$$

$$i_{TBij} = i_{TBij}(K_{DEj});$$

$$i_{QBij} = i_{QBij}(K_{DEj}),$$

а также значения коэффициента влияния корпуса $\eta_{Hij} = (1 - t_j) \cdot i_{TBij} / i_{QBij}$.

5. Определяются потребляемая гребными винтами мощность в «свободной воде»

$$P_{oij} = P_{Bi} \cdot \eta_{shi} \cdot \frac{1}{i_{QBij}} = P_{Di} \cdot \frac{1}{i_{QBij}}, \text{ кВт,}$$

где P_{Di} – мощность на гребном винте за корпусом судна, и скорость протекания воды через диски гребных винтов

$$V_{oij} = V_j, \text{ м/с.}$$

6. Определяются величины коэффициента нагрузки двигателя по моменту в «свободной воде»

$$K_{DQij} = V_{oij} \cdot D_i \cdot \sqrt{\frac{\rho V_{oij}}{P_{oij}}}$$

При этом заранее для каждого типа двигателей должен быть построен график (рис. 2) зависимости коэффициента нагрузки двигателя по моменту K_{DQ_i} от поступи гребного винта J_{oi} , где

$$K_{DQ_i}(J_{oi}) = \sqrt{\frac{J_{oi}^3}{2\pi K_{Qo_i}}}$$

7. По известному значению K_{DQij} определяют величины поступи J_{Oij} и далее, по кривым действия двигателей, находят значения коэффициентов упора и момента

$$K_{To_{ij}} = K_{To_i}(J_{o_{ij}});$$

$$K_{Qo_{ij}} = K_{Qo_i}(J_{o_{ij}}).$$

8. По значению поступи определяют частоту вращения двигателей

$$n_{ij} = \frac{V_{o_{ij}}}{J_{o_{ij}} D_i}, \text{ об/с,}$$

а также их эффективность (КПД)

$$\eta_{o_{ij}} = \frac{J_{o_{ij}} \cdot K_{To_{ij}}}{2\pi K_{Qo_{ij}}},$$

пропульсивный коэффициент

$$\eta_{ij} = \eta_{o_{ij}} \cdot \eta_{Hij} \cdot \eta_{sh_i},$$

упор гребных винтов в «свободной воде»

$$T_{o_{ij}} = K_{To_{ij}} \rho \cdot n_{ij}^2 \cdot D_i^4, \text{ кН.}$$

9. С помощью коэффициентов взаимодействия швартовой схемы определяют упор гребных винтов за корпусом

$$T_{ij} = T_{o_{ij}} \cdot i_{TBij}, \text{ кН,}$$

тягу гребных винтов

$$T_{Eij} = T_{ij} \cdot (1 - t_j), \text{ кН,}$$

момент гребных винтов за корпусом

$$Q_{ij} = K_{Qo_{ij}} \cdot \rho \cdot n_{ij}^2 \cdot D_i^5 \cdot i_{QBij},$$

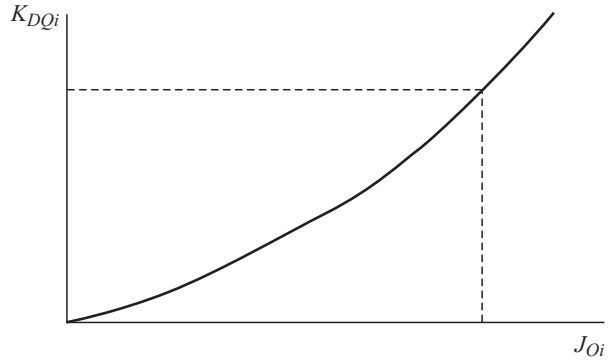


Рис. 2. Зависимость коэффициента нагрузки по моменту K_{DQ_i} от поступи гребного винта J_{oi}

Fig. 2. Torque loading coefficient K_{DQ_i} versus propeller advance coefficient J_{oi}

и суммарную тягу гребных винтов

$$T_{Ej} = \sum_{i=1}^{N_j} (T_{Eij} \cdot Zp_i).$$

10. По полученным значениям T_{Ej} при заданных скоростях V_{Sj} , строится график зависимости $T_{Ej} = T_{Ej}(V_{Sj})$ и определяется пересечение этой зависимости с зависимостью $R_{\Sigma} = R_{\Sigma}(V_S)$, что дает величину искомой скорости хода V_{Sc} , уз.

11. Для найденной скорости хода $V_S = V_{Sc}$ можно определить все величины, характеризующие ледовую ходкость:

- коэффициенты взаимодействия по швартовой схеме i_{TBi} , i_{QBi} ;
- частоту вращения гребных винтов n_i ;
- эффективность гребных винтов η_{oi} ;
- коэффициент влияния корпуса

$$\eta_{Hi} = \frac{(1-t) \cdot i_{TBi}}{i_{QBi}};$$

- пропульсивный коэффициент каждого типа гребных винтов

$$\eta_i = \eta_{sh_i} \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_{Hi};$$

- суммарный пропульсивный коэффициент двигателей судна

$$\eta = \frac{T_{Ec} \cdot V_{Sc}}{P_{Sc}};$$

- тяга гребных винтов и суммарная тяга T_{Eic} , кН,

$$T_{Ec} = \sum_{i=1}^{N_j} T_{Eic} \cdot Zp_i, \text{ кН,}$$

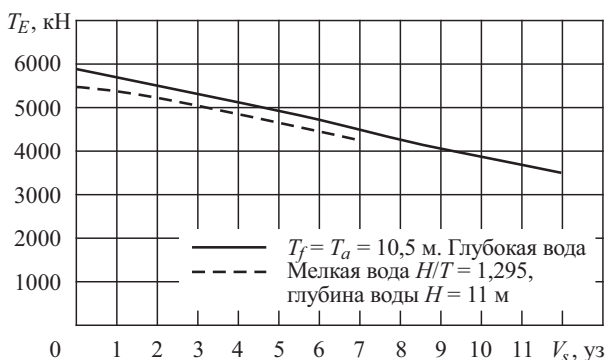


Рис. 3. Зависимость тяги движителей T_E ледокола пр. 22220 от скорости хода V_S на глубокой воде и на мелководье

Fig. 3. Icebreaker Pr. 22220: Effective thrust T_E versus ship speed V_S in deep- and shallow-water conditions

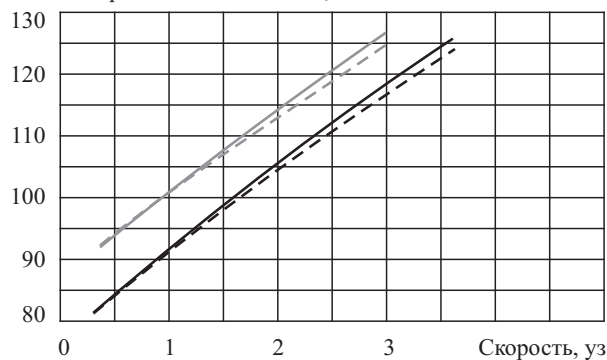
- мощность, потребляемая каждым движителем, и суммарная потребляемая мощность, а также величина располагаемой мощности

$$P_{S_{ic}} = \frac{T_{E_{ic}} \cdot V_{Sc}}{\eta_i}, \text{ кВт};$$

$$P_{Sc} = \sum_{i=1}^{N_i} P_{S_{ic}} \cdot Z_{P_i}, \text{ кВт};$$

$$P_{Bc} = \sum_{i=1}^{N_i} P_{B_i} \cdot Z_{P_i}, \text{ кВт}.$$

Частота вращения движителей, об/мин.



- глубокая вода, бортовые винты
- - - глубокая вода, средний винт
- мелководье $H/T = 1,295$, бортовые винты
- - - мелководье $H/T = 1,295$, средний винт

Рис. 4. Зависимость частоты вращения движителей при движении ледокола во льдах толщиной 2,6 м на глубокой воде и на мелководье

Fig. 4. Icebreaker propeller revolutions in 2.6 m ice under deep- and shallow-water conditions

В любой момент времени потребляемая и располагаемая мощности должны быть равны друг другу. Сопоставление величины мощности потребляемой P_{Sc} и располагаемой P_{Bc} позволяет оценить точность полученного решения.

Приведенные выше выражения относятся к заданным мощностям на фланце двигателя P_{B_i} . Полученный результат легко обобщается на случай парциальных мощностей. Задаваясь рядом парциальных мощностей $C_K \cdot P_{B_i}$, где $C_K \leq 1$, можно выполнить описанный выше алгоритм для ряда значений

$$C_1, C_2 \dots C_K,$$

и получить для многовального судна зависимость потребляемой мощности от скорости хода V_S

$$P_{B\Sigma} = P_{S\Sigma}(V_{Sc}),$$

$$\text{где } P_{B\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_i} P_{B_i}; \quad P_{S\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_i} P_{S_i},$$

а также зависимости частоты вращения гребных валов от скорости хода V_S

$$n_i = n_i(V_{Sc}), i = 1, 2 \dots N_i.$$

Пример расчета ходовых качеств ледокола на мелководье в ледовом поле

Case study: estimation of icebreaker propulsion performance in ice field

Наличие предельного мелководья при определении параметров ледовой ходкости многовального ледокола учитывается через исходные данные для выполнения расчетов. Как было указано выше, на предельном мелководье возрастает ледовое сопротивление ледокола. Наличие мелководья приводит к изменению коэффициентов взаимодействия гребных винтов с корпусом ледокола, и, следовательно, к изменению тяги движителей. Данные, приведенные на рис. 3, позволяют отметить заметное, около 10%, снижение тяги движителей на мелководье по сравнению с глубокой водой.

Описанный выше алгоритм был использован при расчетах ледовой ходкости трехвального ледокола пр. 22220, предназначенного для эксплуатации в условиях арктической зоны, как на глубокой воде, так и на мелководье. Ниже приводятся результаты выполненных по предлагаемой методике расчетов применительно к условиям глубокой воды и мелководья для случая движения ледокола в ледовом поле толщиной 2,6 м.

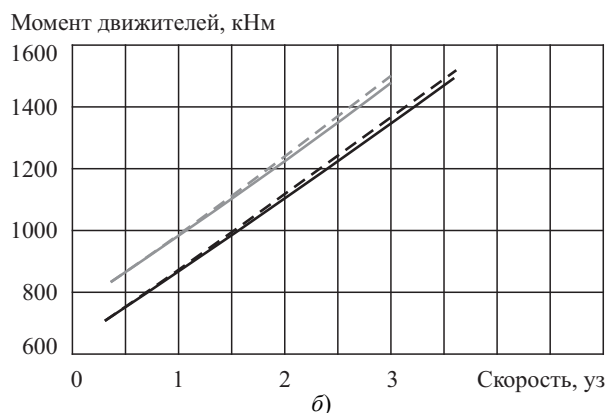
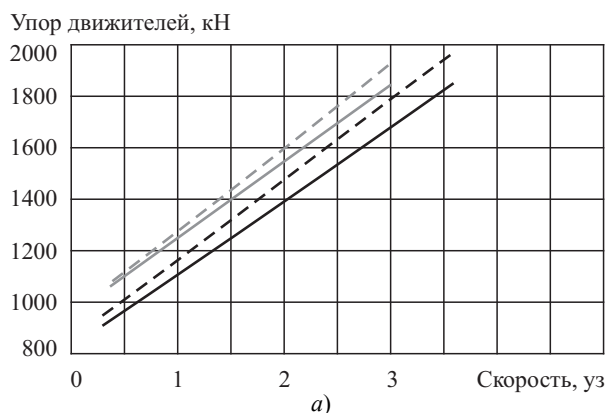


Рис. 5. Зависимость упора (а) и момента (б) движителей при движении ледокола во льдах толщиной 2,6 м на глубокой воде и на мелководье

Fig. 5. Thrust (a) and torque (b) of icebreaker propellers in 2.6 m ice under deep- and shallow-water conditions

- глубокая вода, бортовые винты
- - - глубокая вода, средний винт
- мелководье $H/T = 1,295$, бортовые винты
- - - мелководье $H/T = 1,295$, средний винт

На рис. 4–6 приведены результаты расчетов частоты вращения, упора и момента бортовых и среднего гребных винтов ледокола, а также потребной мощности и пропульсивного коэффициента. Представленные данные позволяют проанализировать влияние мелководья на ледовую ходкость ледокола. Увеличение ледового сопротивления при движении ледокола на предельном мелководье естественно приводит к возрастанию нагрузки на движители, что выражается в росте их частоты вращения, момента и упора. Соответственно возрастает потребная мощность и снижается пропульсивный коэффициент.

Можно отметить, что винты (бортовые и средний) одинаково реагируют на влияние мелководья, т.к. изменения в их работе связаны с увеличением нагрузки.

В данной работе расчеты были выполнены только для одного значения параметра $H/T = 1,295$, где H – глубина акватории; T – осадка ледокола. Очевидно, что при других значениях указанного параметра характер работы двигательного комплекса может измениться. Однако рассмотренную величину можно в какой-то мере считать предельно допустимой, исходя из воз-

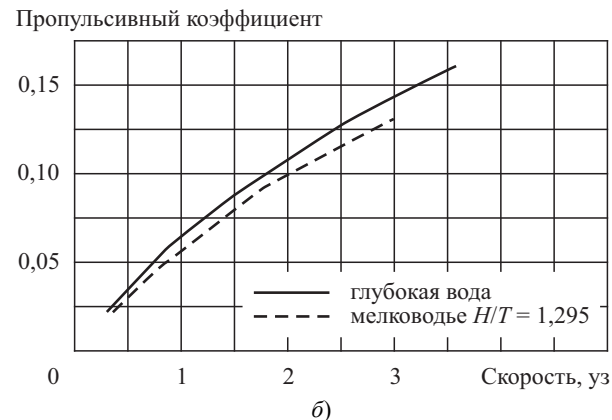
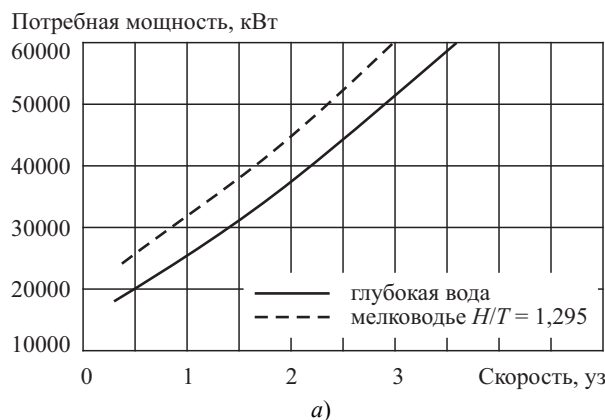


Рис. 6. Зависимость потребной мощности (а) и пропульсивного коэффициента (б) движителей при движении ледокола во льдах толщиной 2,6 м на глубокой воде и на мелководье

Fig. 6. Required power (a) and propulsion coefficient (b) of icebreaker propellers in 2.6 m ice under deep- and shallow-water conditions

можных изменений осадки и дифферента ледокола. Эти изменения связаны с особенностями как гидродинамического взаимодействия корпуса и движителей судна с мелководьем, так и разрушения ледяного покрова [14]. Поэтому модельные испытания и расчеты для меньших значений параметра H/T не проводились.

При анализе особенностей ледовой ходкости ледокола на мелководье необходимо иметь в виду возможный характер изменения ее показателей. Дело в том, что, как показывают результаты исследований [11–13], возрастание ледового сопротивления ледокола происходит только при попадании его на предельное мелководье, когда величина зазора между корпусом и льдом сопоставима с толщиной преодолеваемого льда. Поэтому при выходе ледокола на мелководные участки трассы возможно резкое изменение параметров его ходкости, в первую очередь скорости движения, что может создать опасную ситуацию из-за навала проводимого ледоколом судна. Данные расчетов ледовой ходкости ледокола на глубокой воде и мелководье позволяют спрогнозировать основные параметры его движения и принять меры для преодоления опасной ситуации.

Заключение

Conclusion

В работе описан метод расчета параметров ледовой ходкости многовального ледокола. Термин «ледовая ходкость» означает ходовые качества ледокола, движущегося в ледовом поле. Метод базируется на введении швартовой системы коэффициентов взаимодействия движителей и корпуса. До введения этой системы коэффициентов подобный расчет был невозможен.

Кроме этого, метод позволяет рассчитать все основные параметры, характеризующие движение ледокола во льдах при условии отсутствия взаимодействия гребных винтов со льдом. Такие расчеты могут оказаться крайне полезными для анализа данных натурных ледовых испытаний [7], т.к. позволяют оценить ледовое сопротивление в натурных условиях. В случае же интенсивного взаимодействия гребных винтов ледокола со льдом сравнение натурных и модельных данных с расчетными значениями может дать неоценимую информацию для изучения влияния таких взаимодействий на параметры движения ледокола.

Показано, что влияние мелководья приводит к заметному росту потребной мощности и резкому

снижению скорости хода, что может создать опасную ситуацию из-за навала проводимого ледоколом судна. Данные расчетов ледовой ходкости ледокола на глубокой воде и мелководье позволяют спрогнозировать основные параметры его движения и принять меры для преодоления опасной ситуации.

Библиографический список

References

1. *Доронин Ю.П.* Региональная океанология. Л.: Гидрометеоздат, 1986. [*Doronin Yu.P.* Regional oceanology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. (in Russian)].
2. *Смирнов А.А., Головинский С.А.* Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомный ледокольный флот) // Арктика: экология и экономика. 2014. № 4(16). С. 108–113. [*Smirnov A.A., Golovinsky S.A.* Outlook for the Northern Sea Route (on the occasion of the 55th anniversary of nuclear icebreaker fleet). Arctics: Ecology and Economics. 2014. № 4(16). P. 108–113. (in Russian)].
3. *Апполонов Е.М., Беляшов В.А., Воробьев В.М., Орлов О.П., Симонов Ю.А., Шварев Ю.В.* Проблемные вопросы создания универсального атомного ледокола нового поколения // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 39(323). С. 110–128. [*Appolonov E.M., Belyashov V.A., Vorobiev V.M., Orlov O.P., Simonov Yu.A., Shvarev Yu.V.* Issues in development of a multi-purpose nuclear icebreaker of next generation. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2008. Issue 39(323), P. 110–128. (in Russian)].
4. *Каневский Г.И., Пустошный А.В.* Исследование эффективности работы гребных винтов на швартовном режиме // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 37–42. [*Kanevsky G.I., Pustoshny A.V.* Investigation of propeller operation efficiency in bollard pull conditions. Transactions of Krylov State Research Centre. 2016. Issue 93(377). P. 37–42. (in Russian)].
5. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Щербakov И.В.* Швартовая система коэффициентов взаимодействия гребных винтов с корпусом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59(343). С. 77–88. [*Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Shcherbakov I.V.* Bollard pull system of propeller/hull interaction coefficients. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2011. Issue 59(343). P. 77–88. (in Russian)].
6. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Щербakov И.В.* Расчет тяговых характеристик многовального судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59(343). С. 89–100. [*Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Shcherbakov I.V.* Estimation of pulling perfor-

- mance characteristics of a multi-shaft vessel. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2008. Issue 59(343). P. 89–100. (in Russian)].
7. *Каневский Г.И., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E.* Применение гидродинамических расчетов ледовой ходкости для анализа данных ледовых натуральных испытаний // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 2(380). С. 17–23. [*Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E.* Application of hydrodynamic estimates of ice propulsion performance for analysis of full-scale ship trials in ice. Transactions of Krylov State Research Centre. 2017. Issue 2(380). P. 17–23. (in Russian)].
 8. *Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Ryzhkov A.V., Sazonov K.E.* Propulsion prediction of the Arctic combatant moving in the ice field // Proc. of the 24th Int. Conf. Navy and Shipbuilding Nowadays. St. Peterburg, Russia. 2017, June 29–30. P. 57–63.
 9. *Басин А.М., Веледницкий И.О., Леховитский А.Г.* Гидродинамика судов на мелководье. Л.: Судостроение, 1976. [*Basin A.M., Velednitsky I.O., Lekhovitsky A.G.* Ship hydrodynamics in shallow waters. L.: Sudostroenie, 1976. (in Russian)].
 10. Справочник по теории корабля: в трех томах. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1985. [Handbook on ship theory: three volumes. V.1. Hydro-mechanics. Ship resistance. Ship propulsors. L.: Sudostroenie, 1985. (in Russian)].
 11. *Зуев В.А., Рыбаков В.К.* Особенности плавания ледоколов в условиях мелководья // Проектирование, теория и прочность судов, плавающих во льдах. Н. Новгород, 1992. С. 34–39. [*Zuev V.A., Rybakov V.K.* Specifics of icebreaker operation in shallow waters. Design, theory and structural strength of vessels operating in ice. N. Novgorod, 1992. P. 34–39. (in Russian)].
 12. *Клементьева Н.Ю., Рыжков А.В., Сазонов К.Е.* Модельные исследования ледового сопротивления перспективного ледокола на предельном мелководье // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 51(335). С. 5–12. [*Klementieva N.Yu., Ryzhkov A.V., Sazonov K.E.* Model investigations of ice resistance for an icebreaker of advanced design under ultra-shallow water conditions. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2010. Issue 51(335). P. 5–12. (in Russian)].
 13. *Рыжков А.В., Сазонов К.Е.* Влияние мелководья на ледовые качества судна // Мир транспорта. 2013. № 4(48). С. 40–47. [*Ryzhkov A.V., Sazonov K.E.* Shallow water effect on ice-going performance of ships. Mir transporta. 2013. No. 4(48). P. 40–47. (in Russian)].
 14. *Щемелинин Л.Г., Ильин В.М., Рыжков А.В.* К вопросу о выборе навигационного запаса воды под килем ледокола // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 51(335). С. 113–138. [*Shchemelinin L.G., Ilin V.M., Ryzhkov A.V.* Regarding the choice of navigation water-depth margin under icebreaker keel. Transactions of Krylov Shipbuilding Research Institute. 2010. Issue 51(335). P. 113–138. (in Russian)].
-
- ### Сведения об авторах
- Каневский Григорий Ильич*, д.т.н., руководитель проектов ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-47-91. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Клубничкин Александр Михайлович*, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Рыжков Александр Вениаминович*, генеральный директор – главный конструктор ОАО «ЦКБ «Айсберг»; 199034, Санкт-Петербург, В.О., Большой пр., 36; Тел.: 8 (812) 323-36-09; e-mail: main@iceberg.sp.ru.
- Сазонов Кирилл Евгеньевич*, д.т.н., профессор, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-45-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- ### About the authors
- Kanevsky, Grigory I.*, D. Sc., Project Manager, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-47-91. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Klubnichkin, Alexandr M.*, Head of Sector, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, 196158. Tel.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.
- Ryzhkov Alexander V.*, Director General – Chief Designer, JSC CDB Iceberg. Address: 36, Bolshoi pr., V.O., St. Petersburg, Russia, post code 199034. Tel.: 8 (812) 677-36-09. E-mail: main@iceberg.sp.ru.
- Sazonov, Kirill Ye.*, D. Sc., Prof., Head of Laboratory, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-45-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 29.05.18
Принята в печать / Accepted: 07.08.18
© Коллектив авторов, 2018