

З.С. УСТИНОВА, С.А. УСТИНОВ  
ПАО «ЦКБ «Айсберг»

## РАСЧЕТ ДОПУСТИМОЙ СКОРОСТИ РАЗГОНА ЛЕДОКОЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ НАБЕГАМИ

Проведен сравнительный анализ показателей предельной скорости по критерию остойчивости атомных ледоколов проектов 10521, 22220, 10510, а также расчет с применением критерия по предотвращению столкновения носового ледового зуба в нижней части форштевня с ледовым полем. Анализ показал, что расчета с использованием только ограничения скорости по критерию остойчивости недостаточно, т.к. ледоколы нового поколения имеют большую остойчивость. Необходимо дополнить действующую методику ограничения предельной скорости использованием критерия по предотвращению столкновения носового ледового зуба в нижней части форштевня с ледовым полем.

**Ключевые слова:** атомный ледокол, работа набегами, лед, торосистый лед, скорость разбега.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Устинова З.С., Устинов С.А. Расчет допустимой скорости разгона ледоколов нового поколения при работе набегами. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 187–190.

УДК 629.565.1:629.5.016.5

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-187-190

Z.S. USTINOVA, S.A. USTINOV

PJSC «CDB» Iceberg», Bolshoy Pr. of Vasilyevsky Ostrov, 36, St. Petersburg, Russia

## CALCULATION OF ACCEPTABLE SPEED OF NEW-GENERATION RAISONS RUNNING WHEN RUNNING WORK

A comparative analysis of the speed limits was carried out according to the stability criterion of nuclear icebreakers of the projects 10521, 22220, 10510. The calculation was performed based on the criterion for preventing the collision of the nasal ice tooth in the lower part of the stem with the ice field. The analysis showed that calculations using only the speed limit by the stability criterion are not sufficient, because icebreakers of the new generation are more stable. It is necessary to supplement the current limiting speed limiting technique by using the criterion for preventing the collision of the nasal ice tooth in the lower part of the stem with the ice field.

**Keywords:** nuclear-powered icebreaker, raiding, hummocked ice, run-up speed.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Ustinova Z.S., Ustinov S.A. Calculation of acceptable speed of new-generation raisons running when running work. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 187–190 (in Russian).

UDC 629.565.1:629.5.016.5

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-187-190

### Введение

Перспективы развития судоходства в Арктике и связанные с этим тенденции расширения сроков арктической навигации и районов использования ледоколов и судов ледового плавания вызывают необходимость наращивания мощности СЭУ и, следовательно, их всепогодности и ледопроеходимости.

Ледопроеходимость, необходимая для осуществления круглогодичной навигации во всех районах Арктического бассейна, в том числе для транзитных высокоширотных рейсов, оценивается в пределах не менее 3,5 м. С такой непростой задачей способны спра-

виться только ледоколы-лидеры. На данный момент такие ледоколы в России отсутствуют, но в связи с возрастающим интересом к Северному морскому пути они могут потребоваться уже в ближайшем будущем. В сложившейся ситуации проектирование и строительство ледоколов-лидеров нужно разворачивать уже сегодня, и этому соответствуют работы по проектированию нового атомного ледокола-лидера пр. 10510.

Одной из важнейших задач является выбор оптимальной скорости движения судов во льдах. До настоящего времени данный показатель практически исключительно основывался на личном опыте су-



доводителей. В последние годы в нашей стране и за границей принимаются попытки создать методы, позволяющие обоснованно назначать скорость плавания судов во льдах. У нас получил развитие метод практического определения скорости во льдах с помощью диаграмм, учитывающих основные ледовые качества ледокола и проводимого судна: их ледовую ходкость, ледовую прочность и маневренность во льдах. Такие диаграммы являются основным содержанием так называемого ледового паспорта, которым должен быть снабжен каждый ледокол и судно ледового плавания. В дополнение к этому проектантом выполняется расчет, позволяющий повысить безопасность движения ледокола во льдах. Он заключается в определении значения ограничения скорости разбега при работе набегам ледокола в торосистом льду.

Динамика судна при работе набегам (ударами) в настоящее время изучена недостаточно подробно. Сложность и многообразие процессов, вызывающих сопротивление льда движению судна, а также потребность практики проектирования и эксплуатации судов во льдах привели к тому, что наибольшее внимание уделялось непрерывному движению судов в различных ледовых условиях. Поэтому теоретические и экспериментальные исследования ходкости судов при работе набегам носили разрозненный характер [1].

При работе арктических ледоколов в сплошном ледовом поле встречаются участки с торосами, толщина которых может превышать 4-5 м. Чтобы преодолеть эти торосы, ледокол начинает работать набегам, т.е., отойдя назад на расстояние нескольких длин корпуса, разгоняется и на скорости залезает на лед, используя инерцию корпуса, пытается проломить торос своей массой. Это не всегда получается, т.к. толщина тороса бывает разной. Если толщина значительная, то ледокол налезает на лед, не ломая его. В такой ситуации остойчивость ледокола уменьшается, т.е. уменьшается его поперечная метацентрическая высота. В какой-то момент, если скорость разгона была большой, значение метацентрической высоты может стать отрицательным и ледокол начнет валиться на борт, т.е. получит крен [2, 3].

### Предпосылки проведения расчета

В период эксплуатации неприятная ситуация произошла с атомным ледоколом «Ленин», который, разогнавшись, налез носовой оконечностью на толстый лед и не мог сползти без выполнения некоторых манипуляций. После этого случая было принято

решение при проектировании последующих ледоколов изменить конфигурацию носовой оконечности, добавив в нижней части форштевня ледовый уступ, также называемый ледовым зубом. Ледовый зуб помогает ограничить налезание ледокола на лед.

На ледоколах типа «Арктика» пр. 10521 в носовой оконечности имеется носовой ледовый зуб, но это не помешало ледоколу «Сибирь» на скорости около 8 уз наползти на толстый канадский паковый лед в Восточно-Сибирском море в 1978 г. Чрезмерное наползание носовой оконечности на лед привело к резкому снижению остойчивости и, вследствие этого, накренению ледокола на 8°. Такой крен вызвал падение незакрепленного инвентаря, в том числе посуды, и частичное выливание плавательного бассейна, что вызвало большой дискомфорт у экипажа судна.

После этого происшествия при проектировании ледоколов стало обязательным выполнение проектантом «Расчета допустимой скорости разгона ледокола на лед при работе набегам». Скорость разгона не должна превышать ту, при которой поперечная метацентрическая высота после остановки ледокола могла бы стать меньше величины 0,15 м, что регламентируется РМРС для гражданских судов.

### Расчетная схема наползания судна на лед

Рассмотри схему распределения усилий на форштевне при наползании ледокола на кромку ледяного поля (рис. 1). При ударе о лед ледокола, движущегося со скоростью  $V_p$  в направлении оси ОХ, ледокол упирается в край ледового поля, и в это время происходит смятие кромки ледяного поля и его изгиб, а сам ледокол получает дифферент на корму и всплывает. Здесь появляются две основные силы – равнодействующая сил смятия  $P_N$  и сил трения  $P_T$ . Силы, действующие при этом на носовую часть ледокола, показаны на рис. 1 [4, 5]. Вертикальная составляющая суммы этих сил  $P_Z$  вызывает изгиб ледяного поля, дифферент ледокола и его всплытие, а горизонтальная составляющая  $P_X$  тормозит движение ледокола.

Величину вертикального усилия ледового поля  $P_Z$  при скорости разгона ледокола  $V_p$  можно определить из выражения [4]

$$\frac{DV_p^2}{2} \cos^2 \phi = P_z^2 \cdot c \cdot a + P_z^{3/2} \cdot c \cdot b - P_z \cdot P_e \cdot a - P_z^{1/2} \cdot P_e \cdot b, \quad (1)$$

где

$$c = 0,5 \left( \frac{\sin \phi + f'_T \cdot \cos \phi}{\cos \phi - f'_T \cdot \sin \phi} + \operatorname{tg} \phi \right); \quad (1a)$$

$$a = \left[ \frac{1}{2\sqrt{\rho \cdot g \cdot G}} + \frac{1}{\rho \cdot g \cdot S(1 + \lambda_{33})} + \frac{(L/2 - x_f)^2}{g \cdot D(1 + \lambda_{13}) \cdot H} \right] \cdot \operatorname{ctg} \phi; \quad (1б)$$

$$b = \sqrt{\frac{\cos \phi}{(\cos \phi - f'_T \cdot \sin \phi) \sigma_c \cdot \operatorname{tg} \alpha_0}}, \quad (1в)$$

где  $\phi$  – угол наклона форштевня;  $P_e$  – средняя эффективная тяга винтов;  $L$  – длина по конструктивной ватерлинии (КВЛ);  $\rho$  – плотность морской воды;  $\alpha_0$  – угол наклона носовой ветви КВЛ к диаметральной плоскости;  $D$  – водоизмещение;  $H$  – продольная метацентрическая высота;  $S$  – площадь КВЛ.

В формулах для  $a$ ,  $b$  и  $c$  величины  $\lambda_{13}$  и  $\lambda_{33}$  – коэффициенты присоединенной массы, которые можно определить по формулам Павленко [4]:

$$\lambda_{13} = \frac{B}{T_0} \cdot \frac{1}{3 - 2\alpha} \cdot \frac{1}{3 - \alpha}; \quad (2)$$

$$\lambda_{33} = 0,667 \cdot \frac{\alpha^2}{\delta(1 + \alpha)} \cdot \frac{B}{T_0}. \quad (3)$$

Приведенный коэффициент трения определяется по формуле [4]

$$f'_T = f_T \cdot \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \phi}{\operatorname{tg}^2 \alpha_0}}. \quad (4)$$

Цилиндрическая жесткость  $G$  ледяной пластины определяется по формуле [3]

$$G = \frac{E \cdot h_n^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}. \quad (5)$$

Далее определяется вертикальное перемещение точки приложения реакции  $P_z$  [4]:

$$\begin{aligned} z &= z'_{\Pi} + z_c + z_u = \\ &= z'_{\Pi} + \sqrt{\frac{P_z \cdot \cos \phi}{(\cos \phi - f'_T \cdot \sin \phi) \sigma_c \cdot \operatorname{tg} \alpha_0}} \cdot \operatorname{tg} \phi + \\ &+ \frac{P_z}{2\sqrt{\rho \cdot g \cdot G}}, \end{aligned} \quad (6)$$

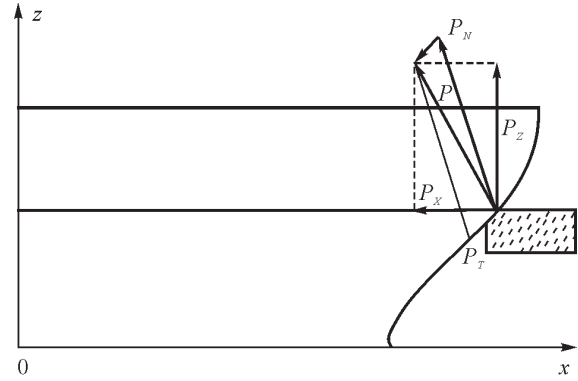


Рис. 1. Схема распределения усилий на форштевне при наползании ледокола на кромку ледяного поля

где  $z_c$  – перемещение за счет смятия льда;  $z_u$  – перемещение за счет изгиба ледяной пластины;  $z'_{\Pi}$  – величина динамического всплытия.

Необходимо учитывать, что значение толщины льда выбирается в зависимости от класса ледокола.

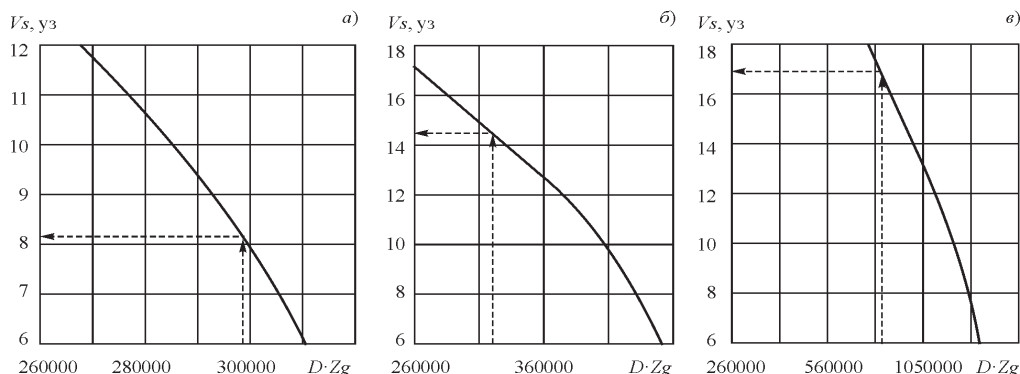
Общую трехмерную задачу при наползании судна на лед и определении реакции льда на судно решали В.И. Каштелян и Д.Е. Хейсин.

### Расчет допустимой скорости

При разработке ледоколов пр. 10521 (рис. 2а), универсального атомного ледокола пр. 22220 (рис. 2б) и ледокола-лидера пр. 10510 (рис. 2в) был выполнен «Расчет допустимой скорости разгона ледокола на лед при работе набегам» и построен график зависимости предельной величины аппликаты Ц.Т. водоизмещения с учетом поправки на влияние свободных поверхностей жидких грузов.

Для ледоколов пр. 10521 значение предельной скорости составило около 8 уз. Для ледоколов нового поколения пр. 22220 и 10510 предельная скорость оказалась значительно больше – около 15 и 17 уз соответственно, – что противоречит опыту безопасной эксплуатации (не более 8 уз). Отсюда следует вывод, что ограничения скорости по критерию устойчивости недостаточно, т.к. ледоколы нового поколения имеют большую устойчивость, чем ледоколы типа «Арктика» пр. 10521, для которых эти расчеты были приемлемы. Встала необходимость ввести дополнительный критерий для определения предельной скорости ледокола при работе набегам.

По специальной методике для пр. 22220 был произведен расчет с использованием критерия по предотвращению столкновения носового ледового зуба в нижней части форштевня с ледовым полем (рис. 3).



**Рис. 2.** Расчет допустимой скорости разгона ледокола на лед при работе набегами: а) проект 10521; б) проект 22220; в) проект 10510

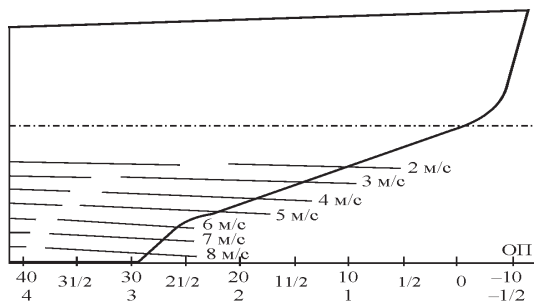
На основании расчета был построен график, где представлено изменение аппликаты точки приложения реакции льда на корпус ледокола  $Z_p$  в зависимости от скорости разгона. По этому графику была найдена предельная скорость разбега из условия соприкосновения носового ледового зуба с ледовым полем. Высота ледового зуба принимается равной около 2,8 м, и поэтому  $Z_p$  не должно быть меньше 2,8 м.

Определив по данной схеме предельную скорость, мы видим, что она имеет меньшее значение, чем скорость, рассчитанная по критерию устойчивости. Таким образом, эта скорость для данного водоизмещения является предельной.

### Выводы

1. Проведен сравнительный анализ показателей предельной скорости по критерию устойчивости атомных ледоколов пр. 10521, 22220, 10510.
2. Выполнен расчет по критерию по предотвращению столкновения носового ледового зуба в нижней части форштевня с ледовым полем.
3. Сделан вывод о том, что действующую методику ограничения предельной скорости необходимо

**Рис. 3.** Изменение посадки ледокола при соответствующей скорости разгона



дополнить использованием критерия по предотвращению столкновения носового ледового зуба в нижней части форштевня с ледовым полем.

### Библиографический список

1. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2013.
2. Капителян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968.
3. Капителян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я. Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972.
4. Крупин В.И., Пальчик А.В., Мельников В.С. Определение допустимой скорости разгона ледокола на лед при работе набегами // Научно-технический сборник (Регистр СССР). 1983. № 13.
5. Хейсин Д.Е. Определение контактных усилий при ударе судна форштевнем о лед // Проблемы Арктики и Антарктики. 1961. № 8.

### Сведения об авторах

Устинова Забава Сергеевна, инженер-конструктор 3 категории проектного отдела ПАО «ЦКБ «Айсберг». Адрес: 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой проспект Васильевского острова, 36. Телефон: 8 (812) 677-36-09. E-mail: zabavik-93@mail.ru.

Устинов Сергей Андреевич, инженер-конструктор 3 категории проектного отдела ПАО «ЦКБ «Айсберг». Телефон: 8 (812) 677-36-09. E-mail: ustinovsmtu@mail.ru.

Поступила / Received: 04.03.18  
Принята в печать / Accepted: 03.05.18

© Коллектив авторов, 2018