

УДК 629.124

**Н.В. Калинина**  
**ВЛИЯНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЬДА**  
**НА ХОДКОСТЬ ЛЕДОКОЛА**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Приведен метод расчета сопротивления при движении судов непрерывным ходом в ровных сплошных льдах. Полуэмпирический способ расчета ледового сопротивления разделен на составляющие и учитывает не только главные размерения судов, но и форму корпуса, физико-механические характеристики льда и снега. Исследовано влияние навигационных характеристик ледяного покрова на ходкость судов на примере ледокола-буксира «Невская застава» проекта 2805 в зависимости от скорости движения и толщины преодолеваемого льда.

**Ключевые слова:** характеристики льда, ледовое сопротивление, кривая ледопроеходимости, ледовая ходкость.

Ледокольный флот на сегодняшний день является наиболее эффективным и фактически безальтернативным средством, обеспечивающим доступ судов в замерзающие порты. Но плавание во льдах характеризуется существенными отличиями в методах управления судном, по сравнению с плаванием по чистой воде, и требует от судоводителя знания многих специальных вопросов, присущих только этому виду плавания. Для успешного ледового плавания судоводитель должен иметь по возможности более обширную информацию о ледовых условиях, так как ледопроеходимость судна будет зависеть от конкретных навигационных характеристик ледяного покрова, условий его формирования. Поэтому исследования ледовой ходкости являются актуальными.

Главная навигационная характеристика льда – сплоченность: отношение площади льдин в зоне, где они распределены равномерно к общей площади этой зоны, выраженное в долях или баллах. В зависимости от сплоченности льды подразделяются на следующие классы: сплошные – 10 баллов; очень сплоченные – 9-10 баллов; сплоченные – 7-8 баллов; разреженные – 4-6 баллов; редкие – 1-3 балла; отдельные льдины – менее 1 балла; чистая вода – лед отсутствует [1].

Следующей по значимости навигационной характеристикой льда является его возраст. Каждой возрастной градации соответствует определенный диапазон его толщины.

К другим важным навигационным характеристикам льда относятся:

- заснеженность – степень покрытия поверхности льда снегом. Наличие снега на поверхности льда, как бы увеличивает его толщину и неблагоприятно сказывается на ледопроеходимости судов и ледоколов. Измеряется по 9 балльной системе: 0 баллов – снега нет, 8 баллов – толщина снега более одного метра;
- разрушенность – степень разрушения льда в процессе таяния, также является важной сезонной навигационной характеристикой. В результате таяния на поверхности льда образуются снежницы, проталины и промоины, нарушающие сплошность ледяного покрова [1].

Степень разрушенности определяется визуально в зависимости от стадии таяния льда по 10 балльной шкале: 0 баллов – разрушенности нет, сплошной лед; 9 баллов – лед полностью разрушен. Шкала оценки разрушенности льда приведена в табл. 1 [1], откуда следует, что эта оценка основана на визуальном восприятии изменения внешнего вида ледяного покрова вследствие его таяния.

Таблица 1. Оценка разрушенности ледяного покрова

Стадии таяния	Оценка в баллах
Таяния нет	0
Снежиц мало (отдельные снежицы)	1
Снежиц много	2
Затопленный лед	3
Проталин мало (отдельные проталины)	4
Проталин много	5
Обсохший лед	6
Гнилой лед	7
Некоторые снежицы замерзли	8
Все снежицы замерзли	9
Не определялись или неизвестны	10

Влияние перечисленных навигационных характеристик льда на ледовую ходкость было исследовано на примере судна проекта 2805 с использованием существующих методик для различных ледовых условий [2,3].

Аварийно-спасательный ледокол-буксир «Невская застава» проекта 2805 построен на ОАО «Судостроительная фирма «Алмаз», город Санкт-Петербург, для работы в акватории Санкт-Петербурга и имеет класс Российского Речного Регистра: «М-СП 3,5 (ледокол) А». Основные характеристики ледокола приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные характеристики ледокола проекта 2805

1.	Класс судна по Российскому Речному Регистру	М-СП 3,5 (ледокол) А
2.	Длина по КВЛ $L_{\text{КВЛ}}$ , м	38,0
3.	Ширина судна $B$ , м	11,8
4.	Высота борта $H$ , м	5,2
5.	Максимальная осадка $T$ , м	3,8
6.	Минимальная осадка без дифферента, м	3,39
7.	Водоизмещение $D$ , т	912
8.	Коэффициент общей полноты $\delta$	0,535
9.	Мощность главных двигателей $N$ , кВт	2×1800
10.	Скорость на чистой воде $v$ , км/ч / м/с	20 / 5
11.	Тяга на швартовах, кН	380
12.	Автономность, сутки	5

Основным режимом движения ледокола в ровных сплошных льдах, толщина которого меньше предельной, является непрерывное движение носом с постоянной (установившееся движение) или переменной скоростью (разгон, торможение). Для оценки ходкости ледокола в таких условиях была использована полуэмпирическая модель чистого ледового сопротивления, полученная с учетом реальной физико-механической картины разрушения ледяного покрова судами на основе теоретико-экспериментальных исследований в Нижегородском государственном техническом университете [3]. Практика показывает, что сплошной ровный однородный бесснежный лед редко встречается в реальных условиях. Поэтому необходимо учитывать наличие снежного покрова [4].

В компактной и удобной для использования форме чистое ледовое сопротивление сплошного льда и снега можно представить в виде составляющих [3]:

$$R = R_{pv} + R_{pct} + R_{ov} + R_{oct} + R_{ch}, \quad (1)$$

где  $R_{pv}$ ,  $R_{pct}$  – зависящая от скорости и статическая составляющие сопротивления разрушению;  $R_{ov}$ ,  $R_{oct}$  – зависящая от скорости и статическая составляющие сопротивления обломков льда;  $R_{ch}$  – сопротивление снега;

$$R_{pv} = k_{pv} Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1\phi} \left( \frac{R_{pct}}{k_{pct}} \right);$$

$$R_{pct} = k_{pct} \frac{h^4}{\alpha d} \left[ \left( 1 + f \gamma_{лт\phi} \right) + k_{c\phi} \gamma_{c\phi} \frac{d\alpha^2}{h} \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \varphi_{2\phi}}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{2\phi}}} + 0,66(1 + f\Phi_{лт}) B\alpha + \frac{k_{c\phi} \Phi_c d\alpha^3 B}{h} \right];$$

$$R_{ov} = k_{ov} \rho_{л} h B v^2 \left[ \left( 1 + \frac{0,19}{(0,215 + Fr_h \operatorname{tg} \varphi_{1\phi})} \frac{\rho}{\rho_{л}} \frac{1}{\alpha h} \right) (\Phi_{и} + f\Phi_{ит}) + \frac{2\rho}{\rho_{л}} \frac{\Omega_{л}}{Bh} (\Phi_{г} + f\Phi_{гт}) \right];$$

$$R_{oct} = k_{oct} (\rho - \rho_{л}) g h \Omega_{л} (\Phi_{и} + f\Phi_{ит});$$

$$R_{ch} = k_{ch} (\rho - \rho_{ch}) g h_{ch} \Omega_{л} (\Phi_{и} + f\Phi_{ит});$$

$$k_{c\phi} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}; k_{c\phi} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}; k_{ch} = 0,429;$$

$$k_{pct} = 1,3 \cdot 10^6 \text{ кПа}^2; k_{pv} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ кПа}^2; k_{oct} = 2,7; k_{ov} = 0,88;$$

$$\gamma_{лт\phi} = \sqrt{\frac{1}{n_{x\phi}^2} + \frac{1}{n_{z\phi}^2}}; \gamma_{c\phi} = \sqrt{\frac{1}{n_{z\phi}^2} - 1};$$

$$\Phi_{лт\phi} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_x^2} + \frac{1}{n_z^2}} dy; \quad \Phi_c = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{\frac{1}{n_z^2} - 1} dy;$$

$$\Phi_{и} = \frac{1}{\Omega_{л}} \int_{\Omega_{л}} n_x n_z d\Omega; \quad \Phi_{ит} = \frac{1}{\Omega_{л}} \int_{\Omega_{л}} n_x \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega; \quad \Phi_{г} = \frac{1}{\Omega_{л}} \int_{\Omega_{л}} n_x^3 d\Omega; \quad \Phi_{гт} = \frac{1}{\Omega_{л}} \int_{\Omega_{л}} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega;$$

$$\Phi_{и\phi} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} \sqrt{n_x^2} dy; \quad \Phi_{ит} = \frac{2}{B} \int_0^{B/2} n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy;$$

$$n_x = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}}; \quad n_z = \frac{\operatorname{tg} \varphi_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2 + \operatorname{tg}^2 \varphi_3}}; \quad \alpha = \sqrt[4]{\rho g / d}; \quad d = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)};$$

$B$  – ширина ледокола, м;  $f$  – коэффициент трения льда о корпус судна;  $h$  – толщина льда, м;  $h_{ch}$  – толщина снега, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $Fr_h = \frac{v}{\sqrt{gh}}$  – число Фруда по

толщине льда;  $v$  – скорость движения, м/с;  $\Omega_{л}$  – площадь подводной части корпуса, облегаемая льдом, м<sup>2</sup>;  $n_x$ ,  $n_z$  – направляющие косинусы внешней нормали к обшивке судна с продольной  $Ox$  и вертикальной  $Oz$  осями;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  – углы наклона батокса к горизонту, ватерлинии к диаметральной плоскости и шпангоута к вертикали в некоторой точке судовой поверхности;  $\varphi_{1\phi}$ ,  $\varphi_{2\phi}$ ,  $\varphi_{3\phi}$ ,  $n_{x\phi}$ ,  $n_{z\phi}$  – углы и направляющие косинусы на форштевне в районе действующей ватерлинии;  $\alpha$  – параметр изгиба пластины на упругом основании;  $d$  – цилиндрическая жесткость ледяной пластины;  $E$  – модуль упругости, кПа;  $\mu$  – коэффициент Пуассона льда;  $\rho$ ,  $\rho_{л}$ ,  $\rho_{ch}$  – плотность воды, льда и снега, т/м<sup>3</sup>;  $k_{pct}$ ,  $k_{pv}$ ,  $k_{oct}$ ,  $k_{ov}$  – эмпирические коэффициенты, компенсирующие неточности теоретической модели сопротивления, которые определены с учетом натуральных данных по ледопроеходимости ледоколов в ровных льдах [2].

Сопротивление (1) учитывает не только главные размерения судов, но и форму корпуса, физико-механические характеристики льда и снега.

Форма корпуса учтена путем введения в расчетные модели интегральных функций геометрии  $\gamma_{\text{лтф}}$ ,  $\gamma_{\text{сф}}$ ,  $\Phi_i$ , которые получены из пространственного рассмотрения взаимодействия корпуса судна со льдом [3]. Для ледокола проекта 2805 они были рассчитаны [3] и приведены в табл. 3.

Таблица 3 Функции геометрии ледокола проекта 2805

Функции	Значения	Функции	Значения	Функции	Значения	Функции	Значения
$\text{tg}(\varphi_1)$	0,462	$\Phi_{\text{лт}}$	3,769	$\Phi_{\text{и}}$	0,147	$\Omega_{\text{л}}, \text{м}^2$	205,7
$\text{tg}(\varphi_2)$	1,247	$\Phi_{\text{с}}$	1,323	$\Phi_{\text{ит}}$	0,336	$S_{\text{вд}}, \text{м}^2$	180,5
$\gamma_{\text{лтф}}$	2,771	$\Phi_{\text{п}}$	0,119	$\Phi_{\text{г}}$	0,032		
$\gamma_{\text{сф}}$	0,592	$\Phi_{\text{ит}}$	0,590	$\Phi_{\text{гт}}$	0,073		

В ходе исследований было выявлено, что ледокол будет преодолевать сплошные ледяные поля как непрерывным ходом, так и прибегать к работе набегам [5].

Зависимости чистого ледового сопротивления в ровном бесснежном льду различной толщины и тяги на гаке от скорости движения рассчитаны и приведены на рис. 1.

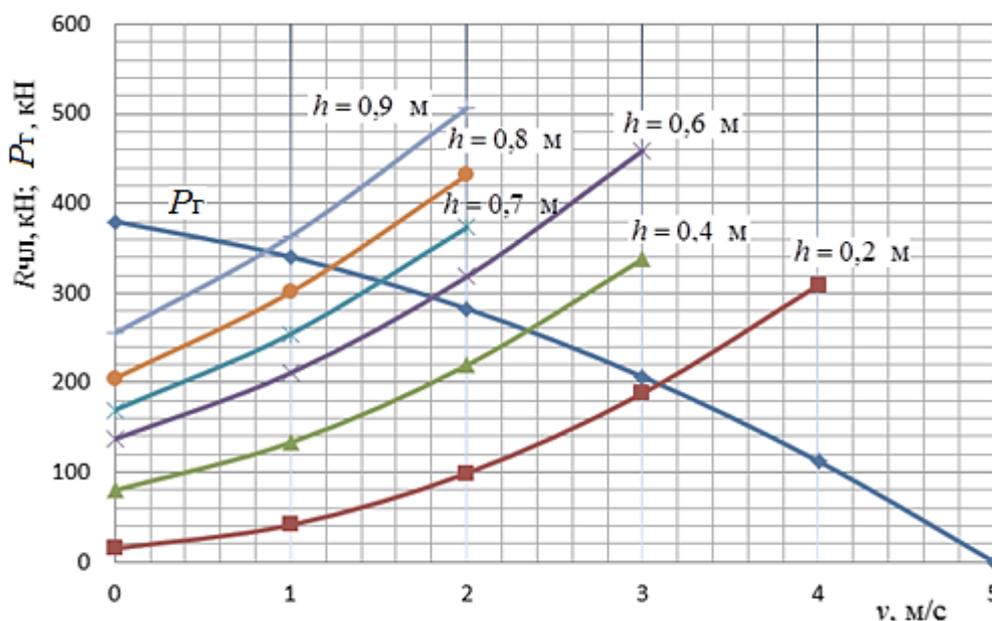


Рис. 1. Кривые чистого ледового сопротивления в бесснежном льду различной толщины для ледокола проекта 2805

Тяга ледокола на гаке аппроксимирована выражением [2]:

$$P_{\text{Г}} = P_{\text{ш}} \left[ 1 - 0,4 \left( \frac{v}{v_0} \right) - 0,6 \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $P_{\text{ш}}$  – тяга ледокола на швартовых, кН;  $v$  – скорость ледокола в текущий момент времени, м/с;  $v_0$  – скорость движения на чистой воде при заданной мощности, м/с. Достижимая скорость судна  $v_0$  определяется из совместного решения уравнений  $P_{\text{Г}} = R$ , где  $P_{\text{Г}} = P_e - R_B$  – тяга на гаке (называемая по аналогии с буксирами), определяется как разность между полезной тягой движителей  $P_e$  и сопротивлением воды  $R_B$  при данной скорости движения.

Кривая ледопроеходимости при движении непрерывным ходом и набегам приведена на рис. 2. Она получена для среднестатистических физико-механических характеристик

речного льда, снега и воды: плотность воды  $\rho=1\text{т/м}^3$ ; плотность льда  $\rho_{\text{л}}=0,9\text{т/м}^3$ ; плотность снега  $\rho_{\text{сн}}=0,3\text{т/м}^3$ ; коэффициент Пуассона  $\mu=0,33$ ; модуль упругости  $E=5\cdot 10^6$  кПа; коэффициент трения льда о наружную обшивку  $f=0,15$ .

По возрасту рассматривался однолетний лед, толщиной до 1 м. Именно такой встречается в районе эксплуатации. Во льдах большей толщины ледокол будет прибегать к работе набегам.

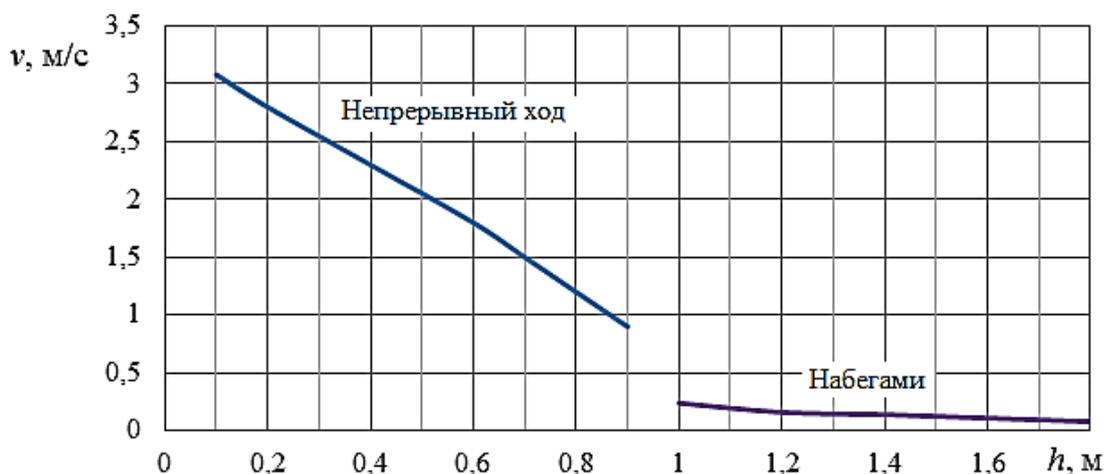


Рис. 2. Кривые ледопроеходимости ледокола проекта 2805 непрерывным ходом и набегами

Заснеженность ледяного покрова увеличивает сопротивление движению судов, уменьшает скорость движения, ухудшает ледовую ходкость.

Кривые ледопроеходимости ледокола при движении в сплошных льдах различной толщины непрерывным ходом в зависимости от заснеженности приведены на рис. 3.

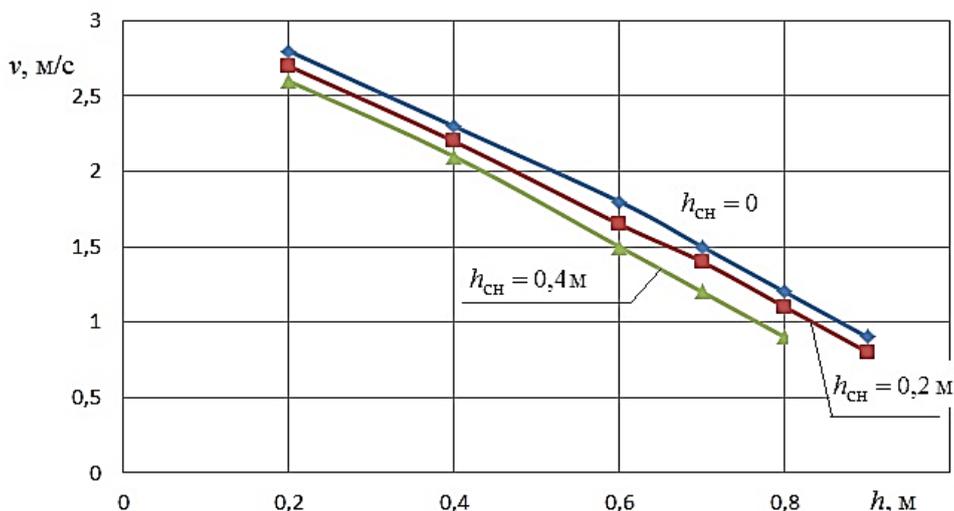


Рис. 3. Кривые ледопроеходимости при различной заснеженности для ледокола проекта 2805

Сопротивление снега не зависит от толщины преодолеваемого льда и скорости движения. Каждые 10 см снега добавляют сопротивление в 12,5 кН.

Это происходит, вероятно, вследствие того, что корпус ледокола не так хорошо скользит по снегу, как по льду, и что много силы бесполезно тратится на прессовку снега. Однако до сих пор механические свойства снега изучены недостаточно подробно, а их

разнообразие и сезонное колебание характеристик не позволяют достаточно полно учесть роль снега в расчетах ледового сопротивления.

Все характеристики снега зависят от его плотности, но вместе с тем плотность снега в высшей степени изменчива, от 0,1 до 0,7 т/м<sup>3</sup>. Плотность снега, находящегося на ледяном покрове, зависит от «истории» его образования, включая все метеорологические факторы, температуру, наличия воды и др. и составляет 0,1 т/м<sup>3</sup> для рыхлого свежеснежавшегося снега. С течением времени под влиянием собственного веса, давления вновь образующихся слоев и уплотняющего действия ветра плотность снега постепенно увеличивается и достигает в среднем 0,30 т/м<sup>3</sup>.

Влияния плотности снега на ледовое сопротивление судна представлено на рис. 4 в зависимости от толщины снежного покрова. Из рис. 4 видно, что плотность снега влияет на его сопротивление. Составляющая сопротивления свежеснежавшегося снега ( $\rho_{сн}=0,1$  т/м<sup>3</sup>) увеличивается на 29 % по сравнению с составляющей слежавшегося уплотненного снежного покрова ( $\rho_{сн}=0,3$  т/м<sup>3</sup>) при любой толщине снега.

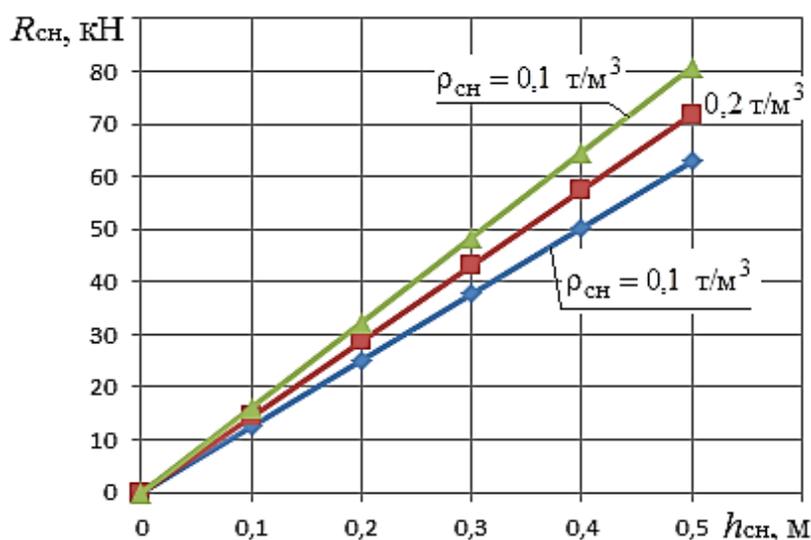


Рис. 4. Составляющая сопротивления снега различной толщины и плотности для ледокола проекта 2805

Наблюдения показывают, что скорость движения ледокола в значительной степени зависит от разрушенности ледяного покрова [4].

В физическом смысле разрушенность отражает комплекс изменений, происходящих в ледяном покрове в результате процесса таяния (нарушение сплошности льда, уменьшение его местной и общей прочности, изменение коэффициента трения и т.д.).

В географическом смысле разрушенность включает в себя более широкое содержание, чем совокупность сезонных изменений толщины льда и его свойств. Основное качественное содержание термина «разрушенность» включает в себя также пространственную неоднородность ледяного покрова, которая образуется в процессе таяния, что приводит к появлению даже на ровном однородном припайном льду участков различной толщины и заснеженности, существенно различающихся по площадям снежниц и сквозных промоин.

Принятая шкала оценки разрушенности (табл. 1) не может быть непосредственно использована при изучении взаимодействия судов и инженерных сооружений со льдом, а существующие качественные градации разрушенности встречаются лишь при описании условий и результатов соответствующих натурных испытаний. При создании математических моделей, а также моделировании взаимодействия судов со льдом принято

использовать численные характеристики физико-механических свойств льда для различных сезонов и районов плавания [3].

Специальные исследования по оценке влияния разрушенности на ходкость в сплошных льдах проводились в Арктике на ледоколах и судах различных типов. Наиболее полные данные получены для ледоколов типа «Москва», «Арктика» и «Капитан Сорокин». В результате обобщения данных наблюдений, выполненных на ледоколах типа «Москва» в припае и больших полях дрейфующего льда, установлено, что при одинаковой средней толщине льда и разрушенности, отличающейся на 1 балл, различия в скорости составляют ~15-20% [3]. Кроме того, с увеличением разрушенности до двух-трех баллов и более происходит нарушение сплошности ледяного покрова за счет появления сквозных проталин и промоин, что приводит к изменению характера взаимодействия корпуса судна и сплошного льда.

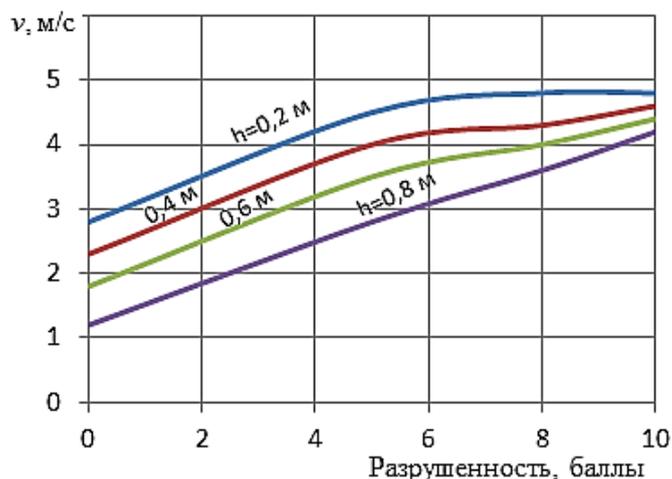
Для определения влияния разрушенности на ходкость ледокола, сделано допущение, что ледовое сопротивление при разрушенности 5 баллов равно ледовому сопротивлению в битых льдах сплоченностью 8 баллов. Сопротивление при разрушенности 0 баллов равно чистому ледовому сопротивлению, а сопротивление при разрушенности 10 баллов равно ледовому сопротивлению в битых льдах сплоченностью 4 балла и приближается к значению сопротивления движению на чистой воде.

Расчет сопротивления сплошного льда был произведен по описанной модели (1), а расчет сопротивления в битых льдах различной сплоченности по эмпирической модели В.А.Зуева [3]:

$$R_{\text{л}} = \rho_{\text{л}} g B h^2 \left( 0,13 \frac{B}{h} + 1,3 Fr_h + 0,5 Fr_h^2 \right) (2 - \bar{S}) \cdot \bar{S}^2, \quad (3)$$

где  $\bar{S}$  – сплоченность битого льда в долях.

Зависимости влияния разрушенности на ледовое сопротивление судна представлены на рис.5.



**Рис 5. Влияние разрушенности ледяного покрова на скорость движения судна проекта 2805**

Из анализа рис. 5 видно, что разрушенность ледяного покрова сильно влияет на ледовую ходкость судов. Чем больше разрушен ледяной покров, тем легче его преодолеть, и судно будет двигаться с большей скоростью.

Изучение влияния навигационных характеристик льда на ходкость судов судоводителями будет способствовать безопасности ледового плавания, выбору правильной тактики движения в сложных путевых условиях.

*Библиографический список*

1. Плавание судов во льдах [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://sea-library.ru/upravlenie-sudnom/351-plavanie-vo-ldah.html>. (Дата обращения 27.02.2017).
2. Грамузов, Е.М. Математическая модель неустановившегося движения ледокола [Текст] / Е.М. Грамузов, Н.В. Калинина // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Р.Е. Алексева «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве». 2016. С. 64-68.
3. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
4. Сазонов, К.Е. О возможном механизме влияния снежного покрова на ледовое сопротивление судов [Текст] / К.Е.Сазонов // Полярная механика. 2016. № 3. С. 417-427.
5. Калинина, Н.В. Прогнозирование ледовой ходкости буксира ледокольного класса пр. 2805 [Текст] // Морской вестник. 2008. № 1(25). С. 96-97.