



Федеральное государственное унитарное предприятие
«КРЫЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОРСКОЙ ЛЕДОТЕХНИКИ

ЛЕКЦИЯ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В МОРСКОЙ ЛЕДОТЕХНИКЕ

К.Е. Сазонов, д.т.н.

Нижний Новгород 2015

В морской ледотехнике теоритические методы применяются:

- для изучения ледовых качеств судов
 - Ледового сопротивления**
 - Ледовой прочности**
 - Ледовой управляемости****
- для расчета глобальной и локальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения**
- для расчетов параметров функционирования морских транспортных систем, эксплуатируемых в ледовых условиях**
- для описания характеристик ледяного покрова**



ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Для определения показателей ледовой ходкости судов необходимо знать величину сопротивления льда движению судна.

Невозможно определить ледовое сопротивление судна для всего многообразия ледовых условий, поэтому эту характеристику определяют для эталонных ледовых условий, под которыми обычно понимают:

- сплошной ровный лед;**
- мелкобитый лед, включая лед в канале за ледоколом;**
- крупнобитый лед и обломки ледяных полей;**
- канал, набитый тертым льдом;**
- торосистые образования**



Теоретические методы расчета ледового сопротивления условно можно разделить на три группы:

- эмпирические;
- полуэмпирические;
- аналитические

Эмпирические методы

Формула Л.Г.Цоя

$$h_{\text{lim}} = \frac{0.07 \cos^2 \varphi_0 \sqrt{\sin \left(\frac{\alpha_0 + \beta_0 + \beta_2}{3} \right)}}{2.6 \sqrt{f_d} \sqrt[5]{\frac{L}{B}} \sin^2 (90^\circ - \beta_{10})} \sqrt{\frac{P_e}{B}} \sqrt[6]{D}$$

где φ_0 - угол наклона форштевня к конструктивной ватерлинии (КВЛ); α_0 - угол наклона носовой ветви ватерлинии к диаметральной плоскости на 0-ом теоретическом шпангоуте; $\beta_0, \beta_2, \beta_{10}$ - углы развала шпангоутов на 0-ом, 2-ом и 10-ом теоретических шпангоутах соответственно; L, B - длина и ширина судна по КВЛ; D - весовое водоизмещение судна, т; P_e - суммарная тяга гребных винтов на режиме, близком к швартовному, т; f_d - коэффициент динамического трения корпуса о лед.

Полуэмпирические методы

Все математические модели, созданные для описания ледового сопротивления судна содержат решение трех основных задач:

- описание процессов, происходящих при движении ледокола во льдах;
- определение критериев разрушения ледового покрова и описание картины его разрушения;
- описание формы поверхности корпуса судна в районе его взаимодействия со льдом.

Уточнение решения указанных задач составляет суть развития методов расчета ледового сопротивления

$$R_{\text{ИТОГ}} = k_1 \sigma_f B h \mu_0 + k_2 \rho_l g B h^2 \mu_0 + k_3 B^x h v_s^y \frac{1}{\eta_2} + R_W, \quad \text{Формула Шиманского - Каштеляна}$$

где σ_f - предел прочности льда на изгиб, ρ_l - плотность льда; h - толщина, преодолеваемого судном льда; B - ширина судна; v_s - скорость движения судна; μ_0, η_2 - коэффициенты Шиманского, характеризующие форму корпуса судна; k_1, k_2, k_3, x, y - неизвестные коэффициенты, подлежащие определению на основе обработки данных модельных и натурных экспериментов.



Полуэмпирические методы

Формула Б.П.Ионова

$$R_I = 0.011\sigma_f h^2 [a_1(\beta)B + 2f_d a_2(\beta)L'] +$$

$$+ 0.15(\rho_w - \rho_I)ghBL' \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha_0}{\operatorname{tg}\alpha_0 + \frac{B}{2L'}} \right) [a_1(\beta)\sin\alpha_0 + f_d a_2(\beta)(1 + \cos\alpha_0)] +$$

$$+ 0.7\rho_I ghB^2 Fr_B \left(1 + \frac{1}{\cos\alpha_0} \right) \left[\frac{\operatorname{tg}^2\alpha_0}{2\operatorname{tg}\alpha_0 - \frac{B}{2L'}} + f_d \right] + \left(\frac{B-2T}{B+2T} \right) (\rho_w - \rho_I)ghBL''$$

здесь L', L'' - длина носового заострения и цилиндрической вставки соответственно;

ρ_w, ρ_I - плотность воды и льда; $Fr_B = \frac{V}{\sqrt{gB}}$ - число Фруда, вычисленное по ширине

корпуса судна; $a_1(\beta), a_2(\beta)$ специальные функции формы корпуса судна, зависящие от распределения углов наклона шпангоутов по длине носового заострения, определяемые следующими выражениями:

$$a_1(\beta) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{0.57}{\sin \beta_i} (1.6 \cos \beta_i + 0.11),$$

$$a_2(\beta) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{\sin \beta_i},$$

где n число шпангоутов в пределах носового заострения, которые используются для определения функций формы; i - текущий номер шпангоута

Аналитические методы

Первая аналитическая формула была получена Р.И.Рунебергом

$$P = R \frac{\cos \alpha \cos \beta - f \sin \alpha}{\sin \alpha \cos \beta + f \sin \beta \cos \alpha}$$

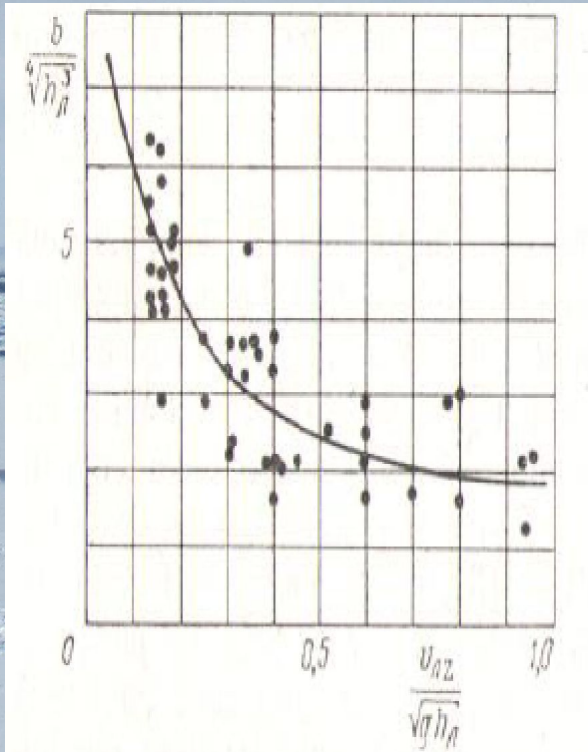
где R - упор винтов; α - средний угол наклона батоксов; β - угол между средним наклоном сечений, перпендикулярных к батоксам и КВЛ; f - коэффициент трения льда.

Аналитические методы отличаются от полуэмпирических тем, что эмпирическая информация используется в них при разработке моделей физических явления, сопровождающих движение судна во льдах, а не для подгонки конечного результата

Аналитические методы делятся на интегральные и дифференциальные

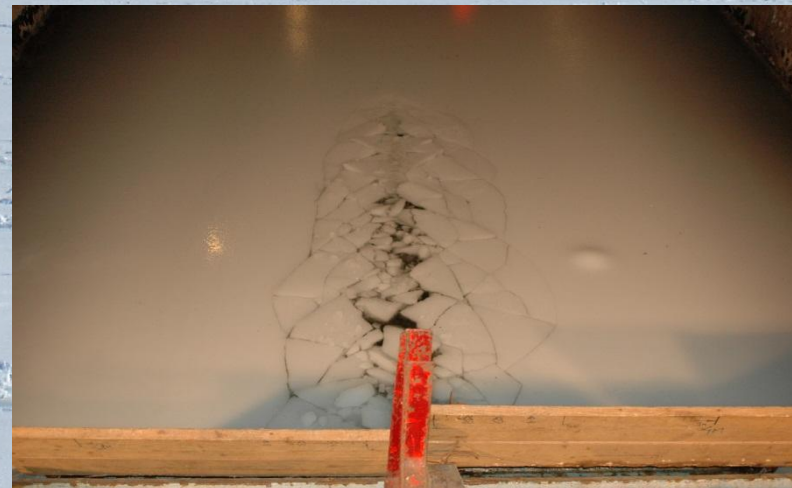
ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. МЕТОД КГНЦ

Зависимость размера сектора от скорости



$$b_c = \left[\frac{1.462}{(Fn_h + 0.3)^{1.213}} + 1 \right] \sqrt[4]{h^3}$$

Картина разрушения льда



Картина разрушения льда

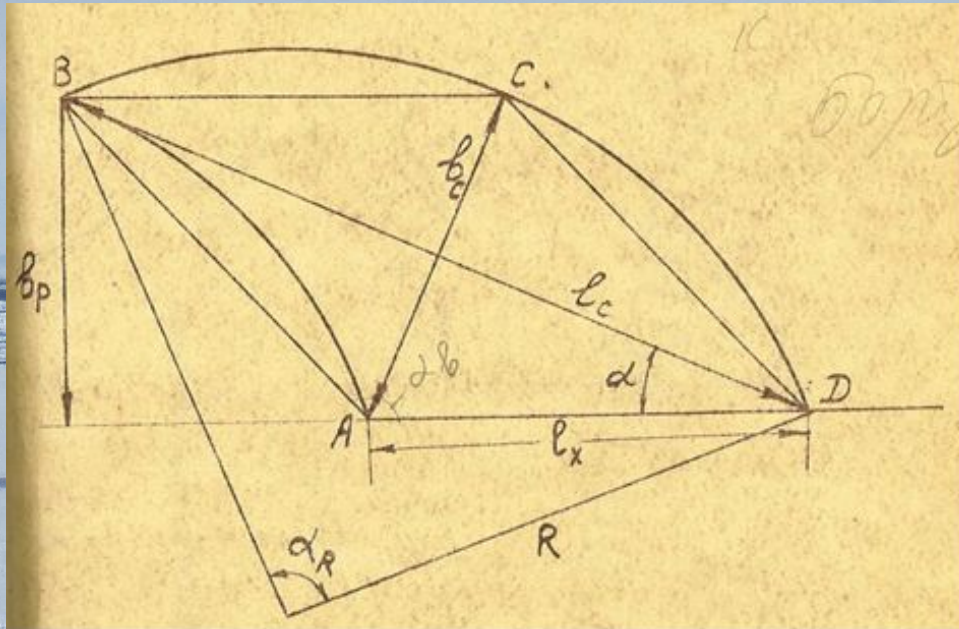
При построении картины разрушения льда ширина сектора определяется с учетом влияния на нее скорости движения ледокола, угла наклона батокса в точке контакта корпуса со льдом, физико-механических свойств льда и его толщины.

При определении остальных размеров секторов приняты следующие допущения:

- концентрическая трещина, по которой образуется сектор, является дугой некоторой окружности, центр которой не обязательно лежит в диаметральной плоскости ледокола;**
- длина сектора параллельна, а ширина сектора перпендикулярна поверхности корпуса ледокола в районе точки контакта со льдом, которая предполагается плоской**



Картина разрушения льда



$$\frac{l_c}{b_c} = \operatorname{ctg} \alpha$$

$$l_x = \frac{b_c}{2 \sin \alpha}$$

$$\alpha_b = \pi - 2\alpha$$

геометрические характеристики сектора льда
 А- точка, в которой приложена нагрузка к
 ледяному выступу; ВСD – трещина, по которой
 выламывается сектор

Алгоритм построения картины разрушения льда

$$y = f(x)$$

уравнение действующей ватерлинии

$$x = f^{-1}(y)$$

$$y = h$$

координата первой точки контакта

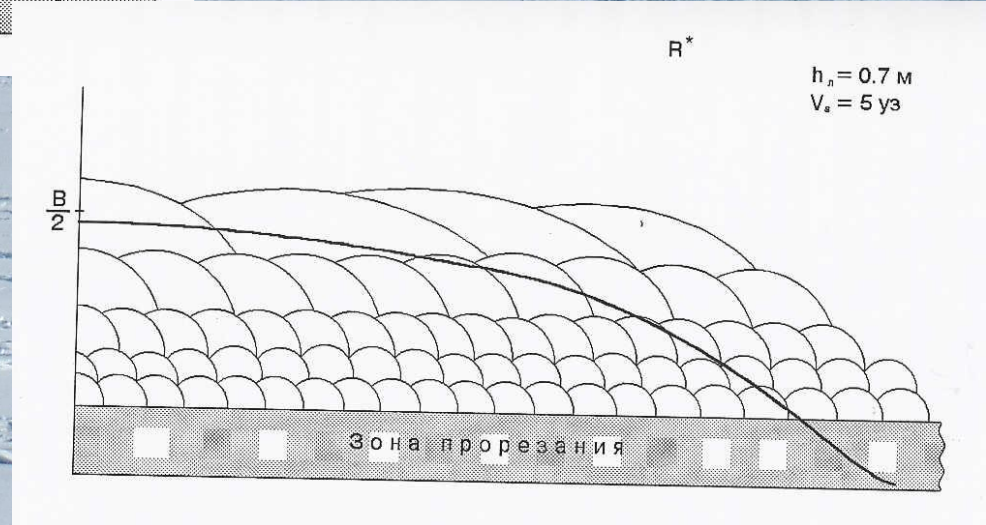
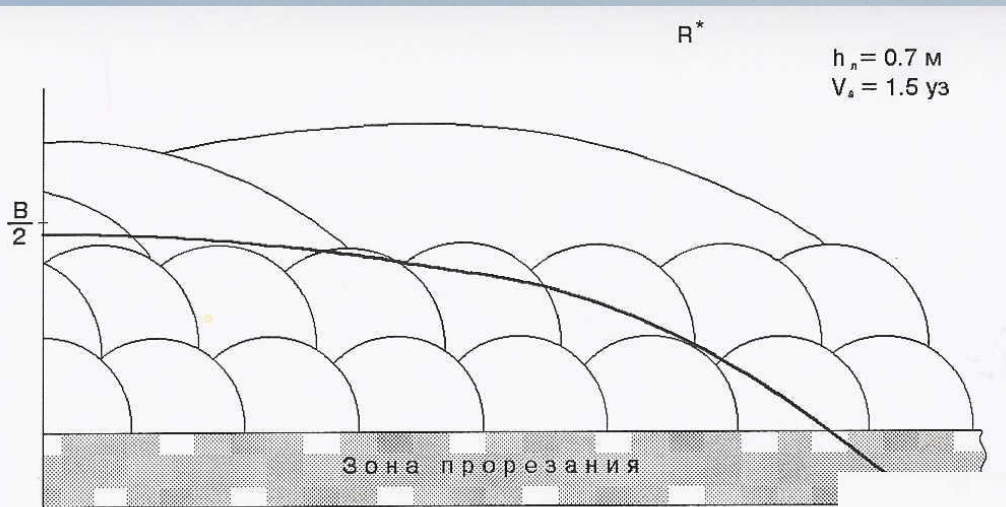
$$y = h + b_{p1}$$

координата следующей точки контакта

Расчет заканчивается при выполнении условия

$$h + \sum_{i=1}^n b_{pi} \geq \frac{B}{2}$$

Общий вид картины разрушения льда



$$R_{ITOT} = R_I + R_W = R_{IB} + R_{IS} + R_{IF} + R_{IV} + R_W$$

где R_{ITOT} - полное ледовое сопротивление, R_I - чистое ледовое сопротивление, R_W - сопротивление воды движению судна; R_{IB} - сопротивление, связанное с разрушением ледового поля; R_{IS} - сопротивление, зависящее от поворота и притапливания обломков разрушенного льда; R_{IF} - сопротивление трения "ледовой рубашки" о корпус ледокола; R_{IV} - добавочное вязкостное сопротивление воды движению судна, возникающее из-за влияния "ледовой рубашки" на процесс обтекания водой корпуса.

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛОМКИ ЛЬДА

$$M(1+k_{11})\ddot{x}_g = T - N[\cos(n, x) + f_{ID} \cos \alpha' \cos \phi],$$

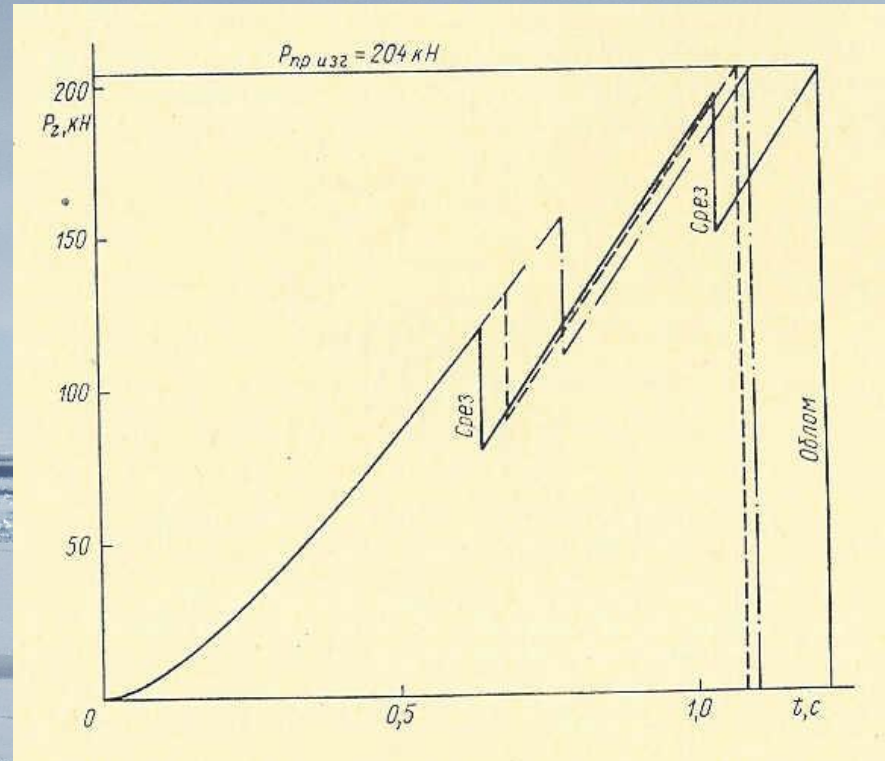
$$M(1+k_{33})\ddot{z}_g = -T\psi - \rho_W gS(z_g - b\psi) - N[\cos(n, z) - f_{ID} \cos \alpha' \sin \phi],$$

$$I_\eta(1+k_{55})\ddot{\psi} = T(h_s + a) + \rho_W gS(z_g - b\psi)(b + a\psi) - DH\psi - \\ - N[\cos(n, x) + f_{ID} \cos \alpha' \cos \phi](f_U + a - z_g) + \\ N[\cos(n, z) - f_{ID} \cos \alpha' \sin \phi](L_A + x_{CM} - x_g)$$

$$N = 2\sigma_c S_{CM}$$

$$f_U = \frac{P_z - Q_I}{z_{pl}} \cdot \frac{1}{2 \left(\frac{\alpha_I}{\pi} \right) \sqrt{\rho_W g D_0}}$$

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛОМКИ ЛЬДА



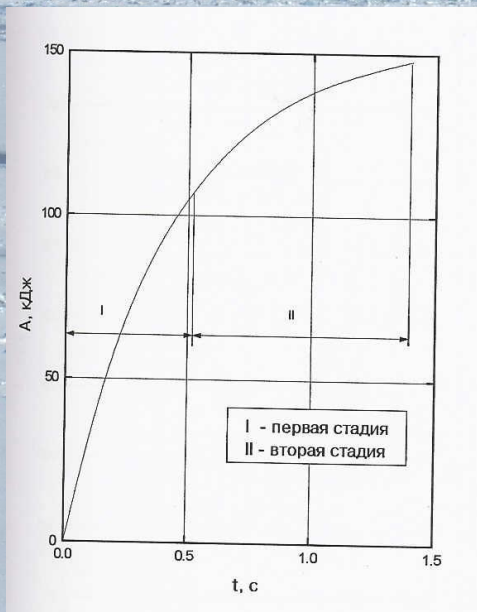
Зависимость вертикального усилия P_z от времени взаимодействия корпуса с кромкой ледяного поля

————— $\sigma_f / \sigma_s = 2$; - - - - - $\sigma_f / \sigma_s = 2.17$; — · — $\sigma_f / \sigma_s = 2.27$

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОВОРОТА ЛЬДА

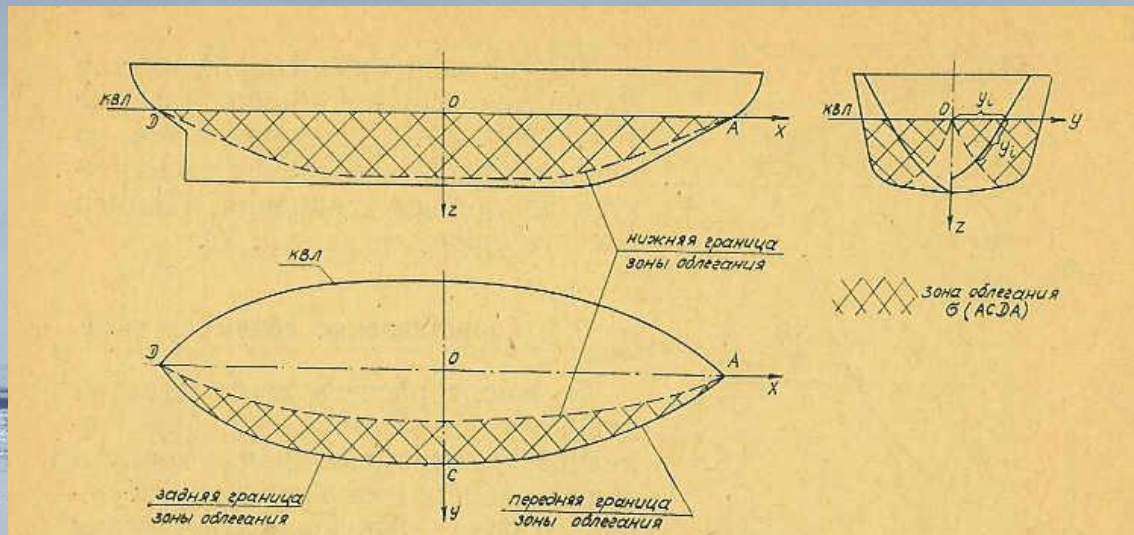
$$\dot{J}\gamma = M_I + M_P + M_A + M_Q + M_W$$

где M_I - момент контактных сил, действующих на сектор со стороны корпуса; M_P - момент силы веса льдины; M_A - момент гидростатических сил; M_Q - момент сил, действующих на сектор со стороны подпирающих его обломков "ледовой рубашки"; M_W - момент сил сопротивления воды; J - момент инерции массы сектора относительно точки поворота с учетом присоединенных масс; γ - угол поворота сектора



Зависимость величины работы от времени, затраченной на поворот одного сектора

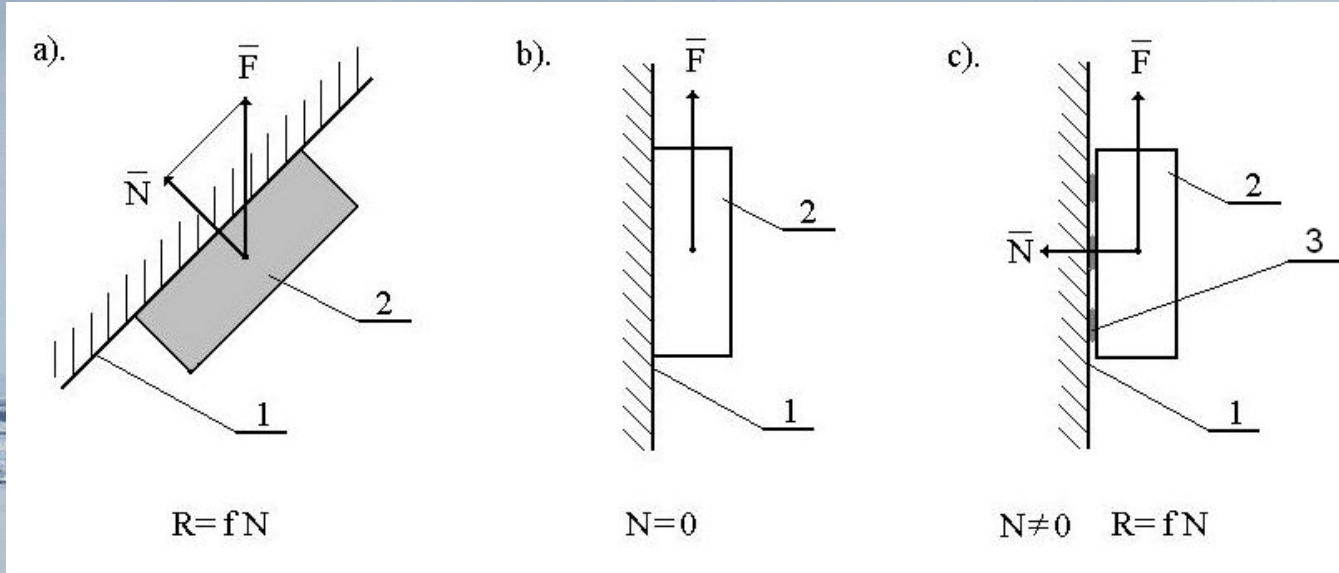
ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЕДОВОЙ РУБАШКИ



Границы распространения «ледовой рубашки» по подводной части корпуса

$$R_{IF} = 2(\gamma_W - \gamma_I)h\Delta L \left\{ \sum_{i=1}^{15} \frac{A_i}{\cos \alpha_i} \cos(n, z) [\cos(n, x) + f_{ID} \cos(V'_i, x)] + \sum_{i=1}^{15} E_i f_{ID} \cos(V'_i, x) \right\}$$

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ



$$N = (\rho_W - \rho_I)gh_I S_I \sin \beta,$$

$$R = f_{ID} N \cos \psi,$$

σ

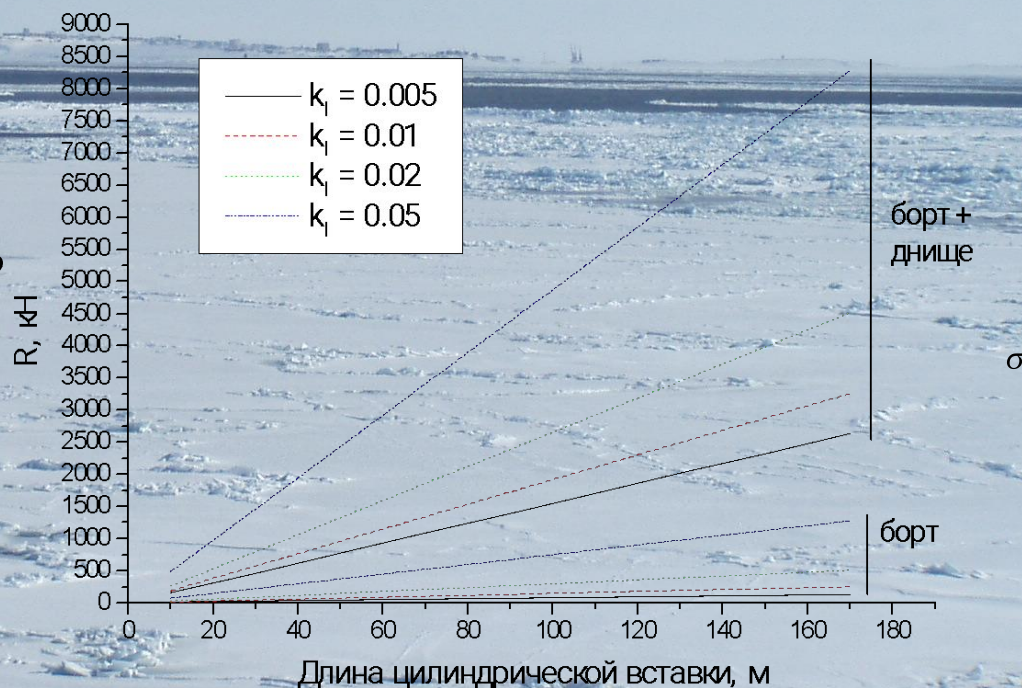
ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ

$$S_K = k_I S_I.$$

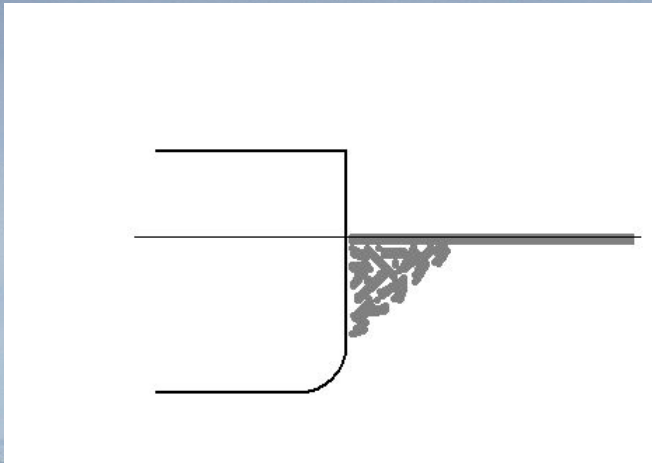
$$R = f_{ID} N_I = f_{ID} (\rho_W - \rho_I) g h_I S_I \left(1 + k_I \frac{\rho_W}{\rho_W - \rho_I} \frac{T}{h_I} \right) \quad \text{днище}$$

$$R = 2 f_{ID} k_I \frac{\rho_W g}{2} T^2 L_{PB},$$

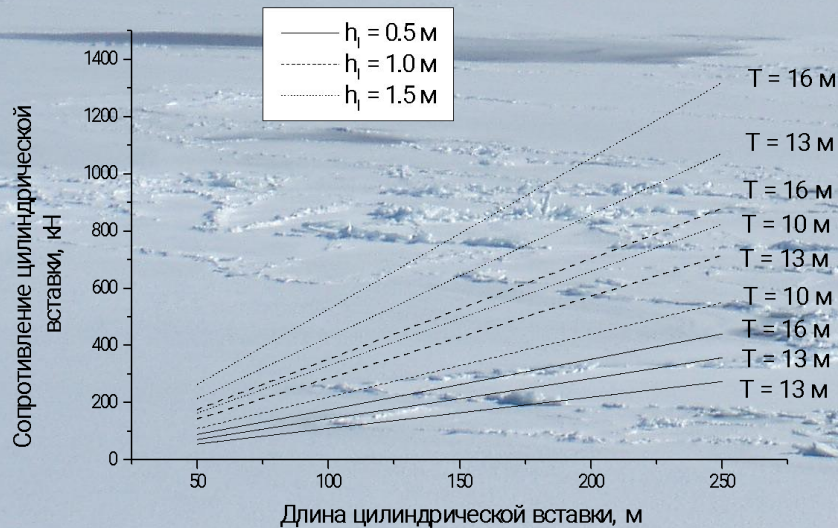
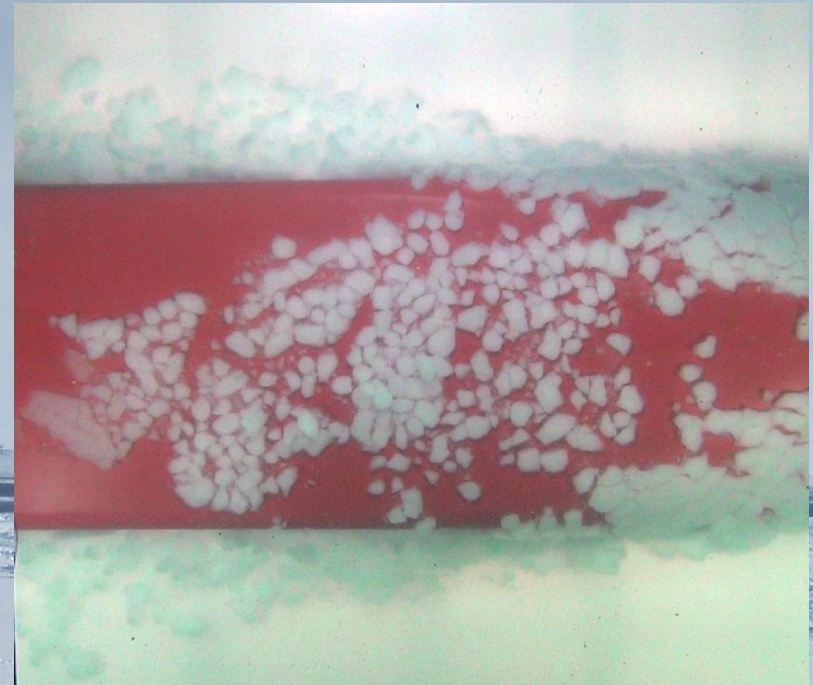
борт



ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ

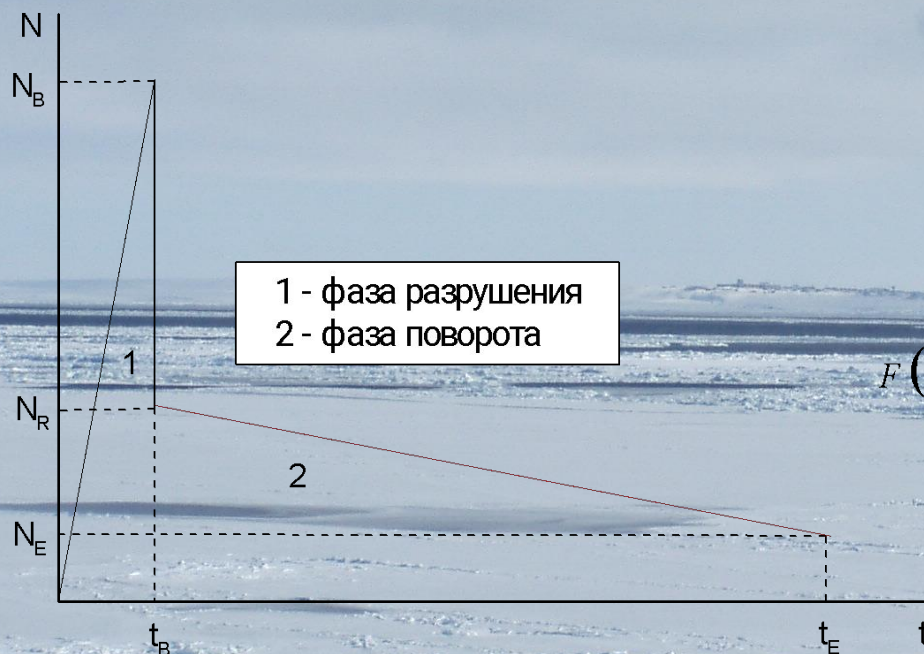


Подводное нагромождение льда, формирующееся у вертикальных бортов цилиндрической вставки



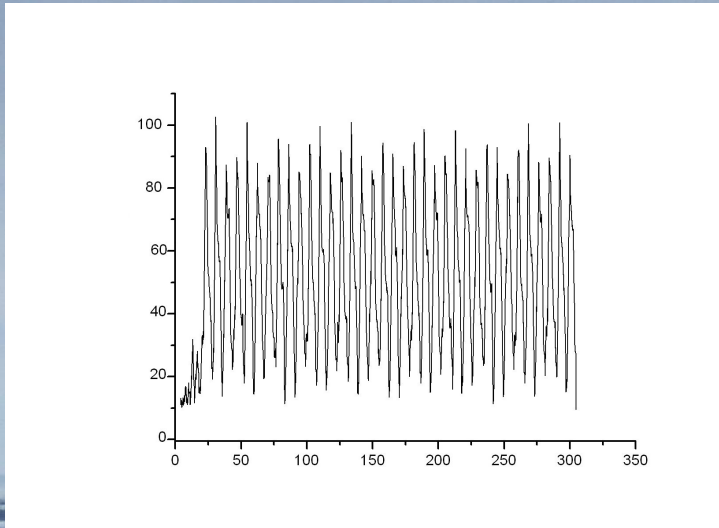
$$R_{\text{цил}} = 0.22 h_I T L_{\text{цил}}$$

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА



$$F(t) = \begin{cases} \frac{\sigma_c V_n^2 t^2 \operatorname{tg}(\alpha_I/2)}{\sin \beta'} (\sin \beta' - f_{id} \sin \varphi) & t \leq t_B, \\ \left[\frac{1.04 \sigma_f h_I^2 \left(\frac{\alpha_I}{\pi}\right) + \Delta \gamma h_I l_c B_I k_Q \cos^2 \beta'}{\sigma_c V_n^2 \operatorname{tg}(\alpha_I/2) (\sin \beta' - f_{id} \sin \varphi)} \right] \sin \beta' & t_B \leq t \leq t_E, \\ \left(F_E - F_R \right) \frac{t - t_E}{t_E - t_B} + F_E & t_B \leq t \leq t_E, \\ F_R = \frac{\Delta \rho g b_c l_c h_I (k_v b_c + 2k_Q B_i \cos^2 \beta')}{2 \sqrt{b_c^2 + 0.36 h_I^2} \sin(\beta' - \theta_L)} (\sin \beta' - f_{id} \sin \varphi), \\ F_E = \Delta \rho g b_c l_c h_I (1 - \sin \beta' \sin \varphi), \\ t_E = \frac{l_x}{V_S} \end{cases}$$

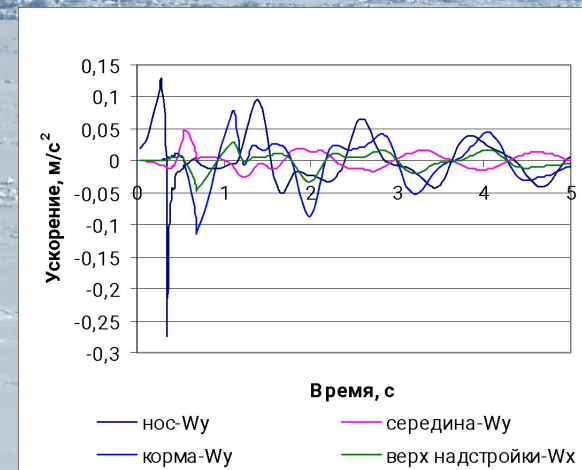
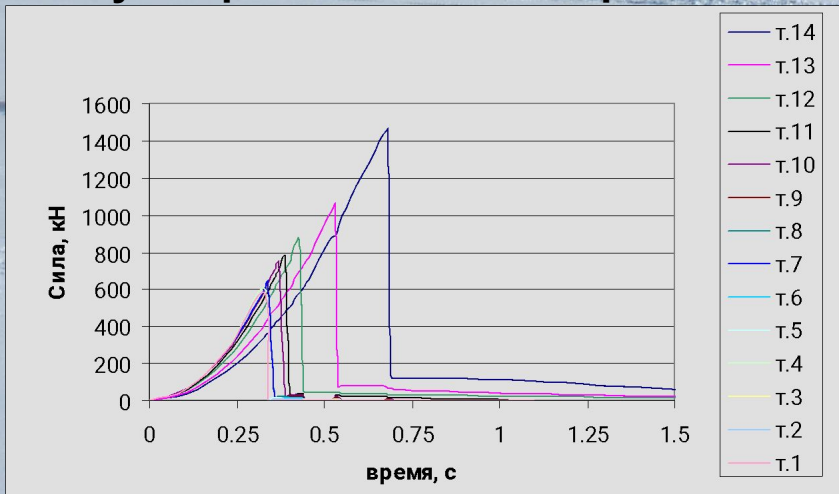
ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. АСИНХРОННОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



$$T_{i+1} = \frac{f^{-1}(h) - f^{-1}\left(h + \sum_{i=1}^{n-1} b_{p_i}\right)}{V_s};$$



Суммарное ледовое сопротивление R ледокола с учетом сдвига фаз



Временная функция вертикальной силы, самостоятельное плавание

Временные функции ускорений корпуса при самостоятельном плавании

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. МЕЛКОБИТЫЙ ЛЕД

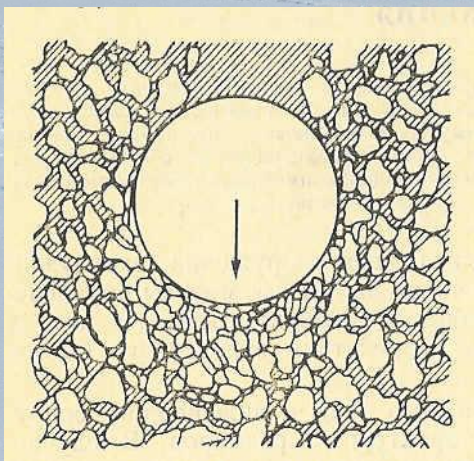
Формула А.Я.Рывлина

$$R_I = 10 \left[\rho_I \sqrt{rh_I} \left(\frac{B}{2} \right)^2 k_1 \left(1 + 2f_{ID} \alpha_B \frac{L}{B} \right) + k_2 \rho_I rh_I B (f_{ID} + \alpha_B \operatorname{tg} \alpha_0) Fn + \right. \\ \left. + k_3 \rho_I rh_I L \operatorname{tg}^2 \alpha_0 Fn^2 \right]$$

$$k_1 = (3 - 2s + 0.25s^2) \cdot 10^{-2}; \quad 6 \leq s \leq 10;$$

$$k_1 = 0; \quad s < 6;$$

$$k_2 = 0.46 - 0.305s + 0.1125s^2. \quad rh = 0.0114 + 0.4543h_I + 0.5429h_I^2$$

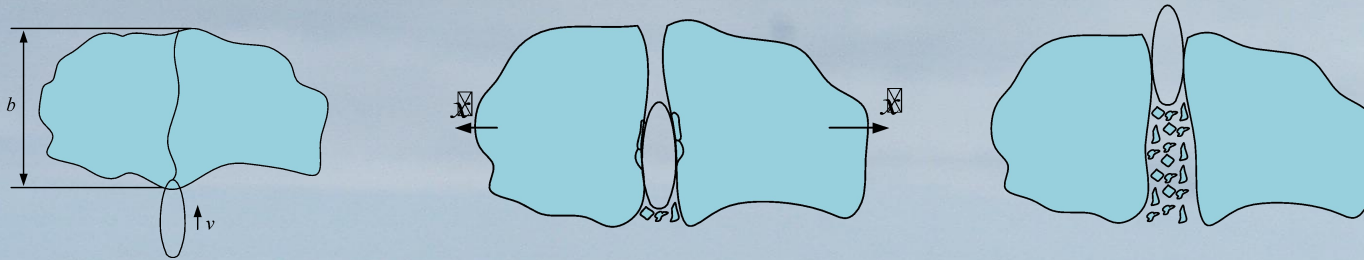


$$L' = \frac{B}{2 \operatorname{tg} \delta'}$$

$$L^* = L + L'$$

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. КРУПНОБИТЫЙ ЛЕД

$$R_I = (C + 9v^{1.3})h_I^{1.2}$$

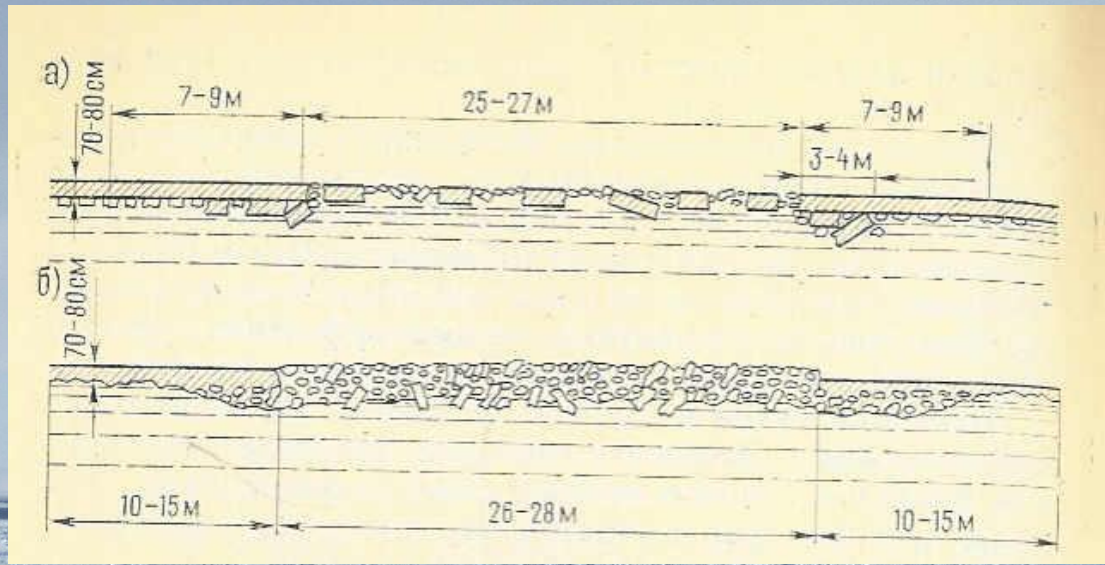


$$(1 + k)M_I \boxtimes = F - P_W - P_I$$

$$\bar{R}_{Ic} = \frac{1}{t^*} \int_0^{t^*} R_{Ic}[x(t)]dt$$

$$R_I^* \approx \frac{vt^*}{b} R_{Ic}$$

ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. НАБИТЫЕ КАНАЛЫ

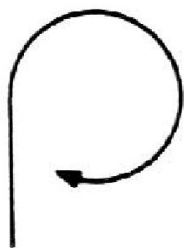


$$R_{ch} = C_1(H_F + H_M)^2 \left(B + 1.85H_F - \frac{2H_F}{\operatorname{tg}\psi} \right) (0.15\cos\varphi_2 + \sin\psi \sin\alpha) +$$

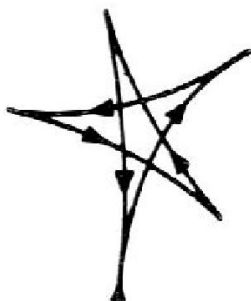
$$+ C_2 L_{PM} H_F^2 + C_3 \left(\frac{LT}{B^2} \right)^3 H_M A_{wf} F n^2,$$

где φ_2 – угол наклона батокса в точке, в которой ширина корпуса равна $B/4$; A_{wf} – площадь носовой ветви ватерлинии; H_M – толщина набитого льда в канале; H_F – увеличение толщины набитого льда при движении судна $H_F = 0.26 + \sqrt{(H_M B)}$; $C_1 = 0,85 \text{ кН/м}^3$; $C_2 = 0,04 \text{ кН/м}^3$; $C_3 = 1,2 \text{ кН/м}^3$.

ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. ОСНОВНЫЕ МАНЕВРЫ



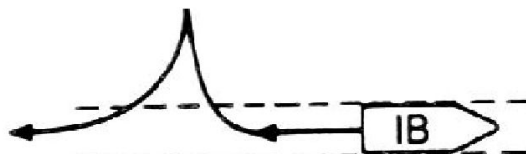
Пиркулятия



Разворот методом «елочка»



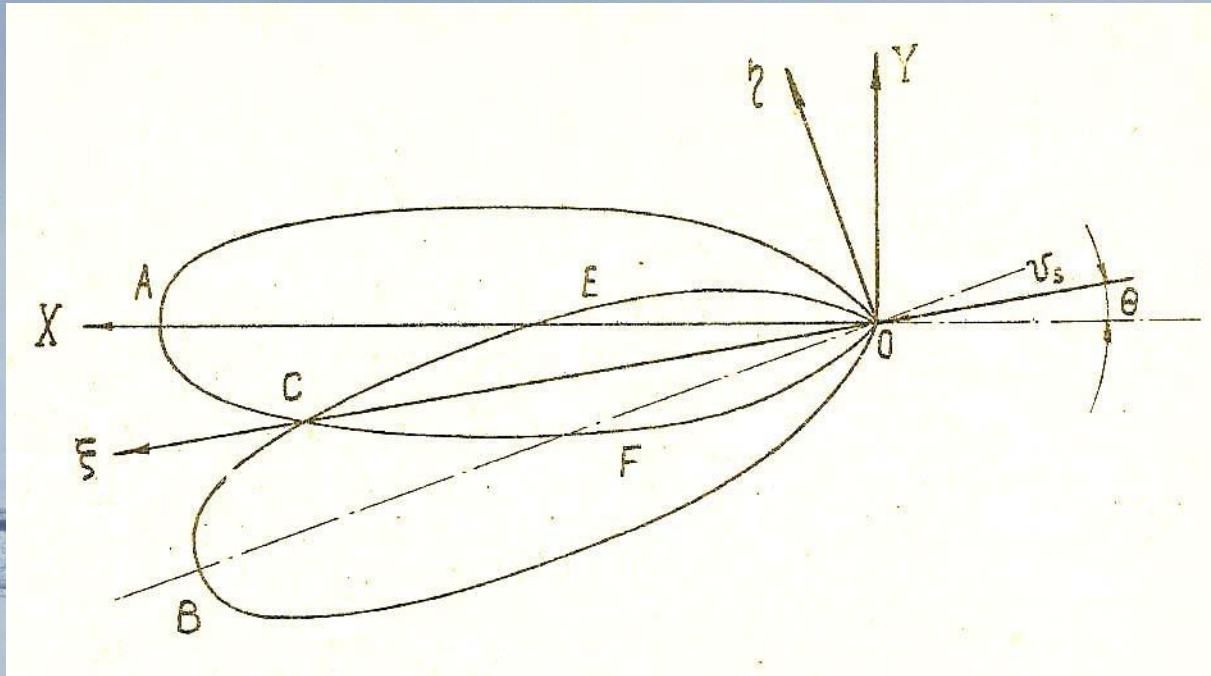
Выход из канала



Выход кормой из канала



ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. ДВИЖЕНИЕ С УГЛОМ ДРЕЙФА



$$\alpha_b = \alpha + \theta;$$

$$\alpha_s = \alpha - \theta;$$

$$\beta_b = \arctg \frac{\operatorname{tg} \beta}{(1 - \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \alpha) \cos \theta};$$

$$\beta_s = \arctg \frac{\cos \theta \operatorname{tg} \beta}{1 + \sin \theta \operatorname{tg} \alpha};$$

$$\xi_b = [x - y \operatorname{tg} \theta] \cos \theta;$$

$$\xi_s = [|y| - x \operatorname{tg} \theta] \sin \theta + x / \cos \theta;$$

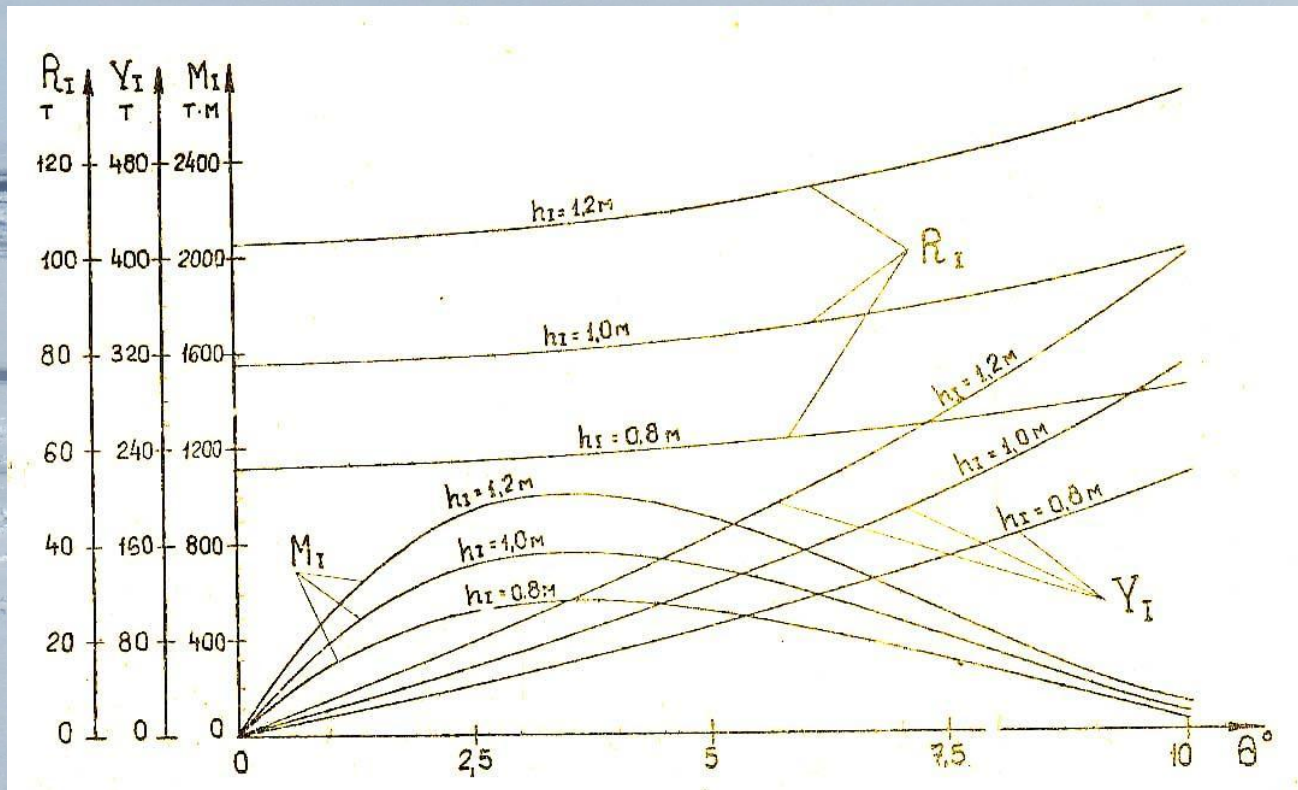
$$\eta_b = [x - y \operatorname{tg} \theta] \sin \theta + y / \cos \theta;$$

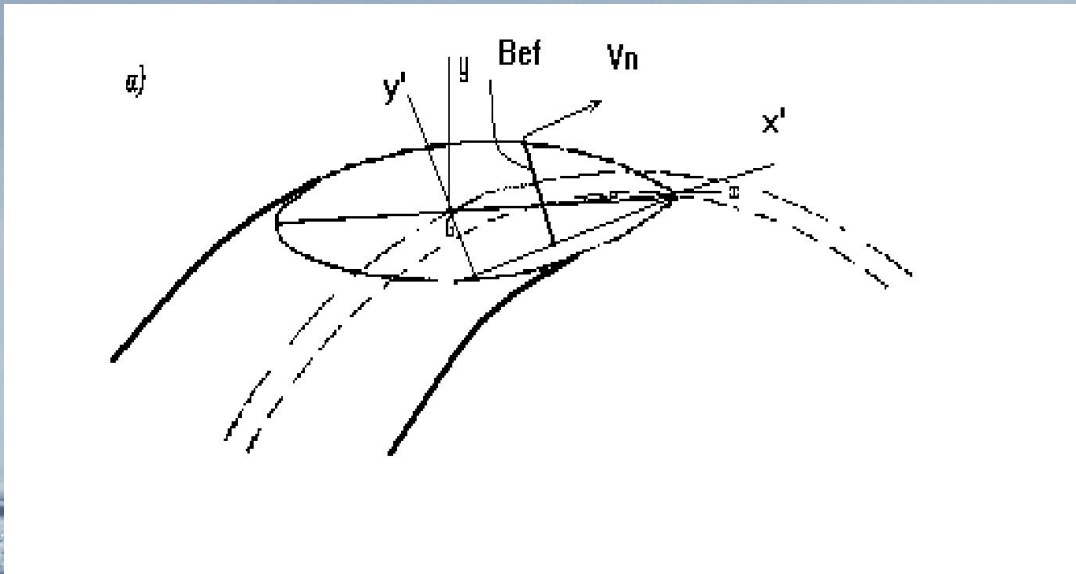
$$\eta_s = [|y| - x \operatorname{tg} \theta] \cos \theta;$$

ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. ДВИЖЕНИЕ С УГЛОМ ДРЕЙФА

$$X_1 = N_1 [\sin(\alpha_{b(s)} \boxtimes \theta) + f_{ID} \cos(\alpha_{b(s)} \boxtimes \theta)],$$

$$Y_1 = N_1 [\cos(\alpha_{b(s)} \boxtimes \theta) - f_{ID} \sin(\alpha_{b(s)} \boxtimes \theta)],$$





$$V_n^{ex} = V_s \sin(\alpha + \beta) - \omega r \operatorname{sign} \theta \cos(\alpha + \theta) \quad q_l = k_s B_{ef} + k_d V_n$$

$$V_n^{in} = V_s \sin(-\alpha + \beta) - \omega r \cos(\alpha + \theta)$$

$$B_{ef} = \frac{|y|}{\cos \theta_1} + \left(\frac{L}{2} - |x| - |y| \operatorname{tg} \theta_1 \right) \sin \theta_1,$$

$$\theta_1 = \frac{V_s \sin \beta - \omega r \cos \theta}{V_s \cos \beta + \omega r \sin \theta}$$

ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ

$$R_I = R_{ST} + AV_S$$

$$k_s = \frac{R_{IS}}{2 \int_0^{L/2} y(x)(\cos\beta' \sin\alpha + f_{Id} \cos\varphi \cos\alpha) dx},$$

$$k_d = \frac{A}{2 \int_0^{L/2} \sin\alpha(\cos\beta' \sin\alpha + f_{Id} \cos\varphi \cos\alpha) dx}$$

$$F_X = \int_{x_1}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{ex} \sin\alpha)(\cos\beta' \sin\alpha + f_{Id} \cos\varphi \cos\alpha) dx +$$

$$+ \int_{x_2}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{in} \sin\alpha)(\cos\beta' \sin\alpha + f_{Id} \cos\varphi \cos\alpha) dx$$

$$F_Y = \int_{x_1}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{ex} \sin\alpha)(\cos\beta' \cos\alpha - f_{Id} \cos\varphi \sin\alpha) dx -$$

$$\int_{x_2}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{in} \sin\alpha)(\cos\beta' \cos\alpha - f_{Id} \cos\varphi \sin\alpha) dx$$

$$M = - \int_{x_1}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{ex} \sin\alpha)(\cos\beta' \cos\alpha - f_{Id} \cos\varphi \sin\alpha) x dx +$$

$$\int_{x_1}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{ex} \sin\alpha)(\cos\beta' \sin\alpha + f_{Id} \cos\varphi \cos\alpha) y dx +$$

$$\int_{x_2}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{in} \sin\alpha)(\cos\beta' \cos\alpha - f_{Id} \cos\varphi \sin\alpha) x dx -$$

$$\int_{x_2}^{L/2} (k_s B_{ef} + k_d V_n^{in} \sin\alpha)(\cos\beta' \sin\alpha + f_{Id} \cos\varphi \cos\alpha) y dx$$

ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. ДВИЖЕНИЕ НА ЦИРКУЛЯЦИИ

руль

$$X + X_I + X_R + T_E = 0;$$

$$Y + Y_I + Y_R = 0;$$

$$M + M_I + M_R = 0.$$

ВРК

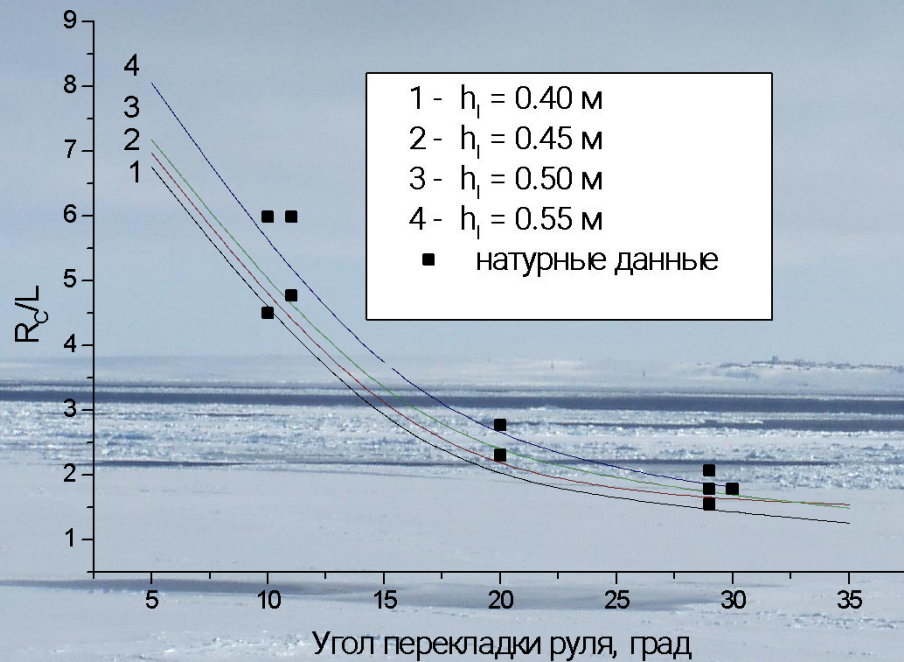
$$X + X_I + T_E \cos \delta = 0;$$

$$Y + Y_I + T_E \sin \delta = 0;$$

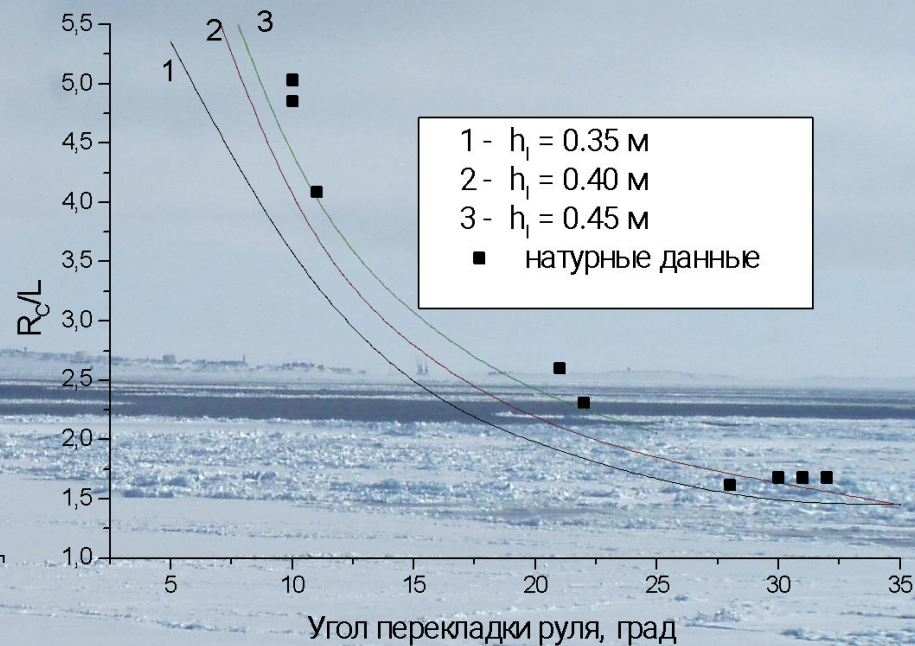
$$M + M_I + T_E \sin \delta \cdot l_{AP} = 0.$$

$$-\rho V(1+k_{22})v_S \omega \beta - C_{X_0} \frac{\rho}{2} v_S^2 A_{L\sigma} - X_I - \left\{ \begin{array}{c} C_{XR} \frac{\rho}{2} v_S^2 A_{RE} \\ 0 \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} T_E \\ T_E \cos \delta \end{array} \right\} = 0;$$
$$-\rho V(1+k_{11})v_S \omega + (C_{Y\beta}^{\beta} \beta + c_2 \beta |\beta|) \frac{\rho}{2} v_S^2 A_{L\sigma} + Y_I - \left\{ \begin{array}{c} Y_R \\ T_E \sin \delta \end{array} \right\} = 0;$$
$$C_{M\beta}^{\beta} \frac{\rho}{2} v_S^2 A_{L\sigma} L \beta - C_{M\omega}^{\omega} \frac{\rho}{2} v_S A_{L\sigma} L^2 \omega - M_I + \left\{ \begin{array}{c} Y_R l_R \\ T_E \sin \delta l_{AP} \end{array} \right\} = 0$$

ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. ДВИЖЕНИЕ НА ЦИРКУЛЯЦИИ

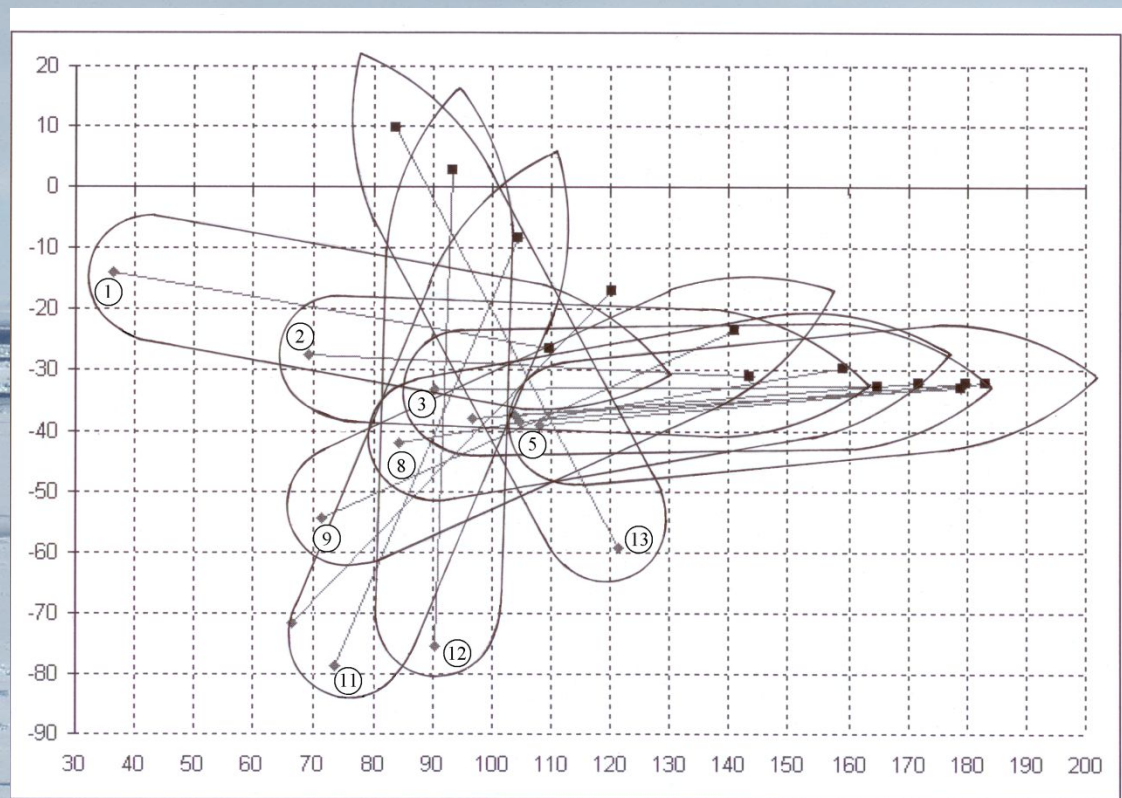
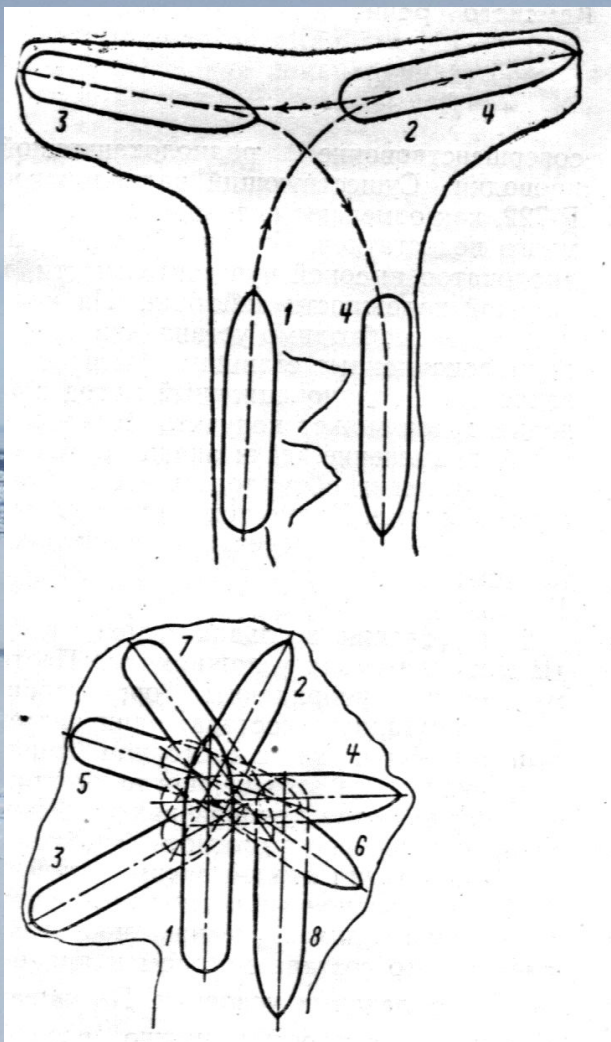


N max

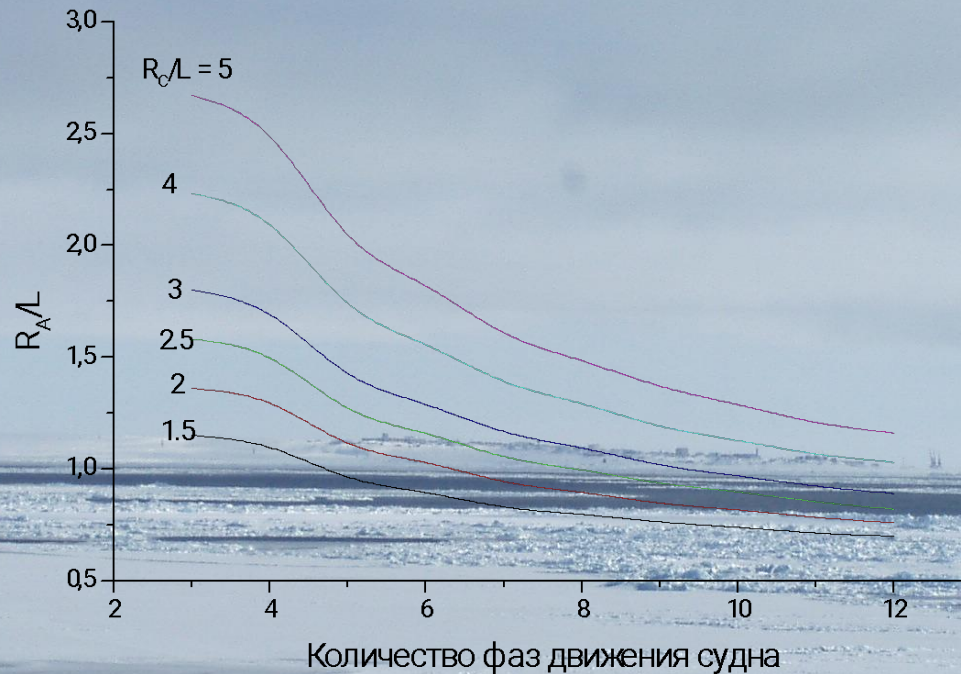


0,66 N max

ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. РАЗВОРОТ ЗВЕЗДОЧКОЙ



ЛЕДОВАЯ УПРАВЛЯЕМОСТЬ. РАЗВОРОТ ЗВЕЗДОЧКОЙ

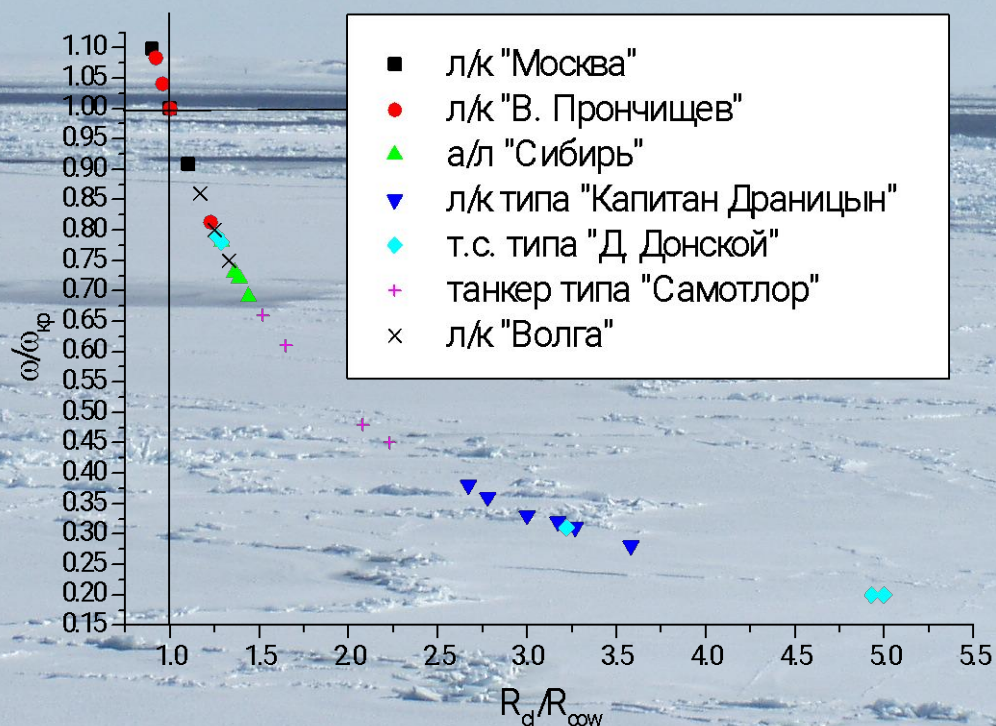


Характерный размер акватории, необходимой для разворота судна способом «елочка»

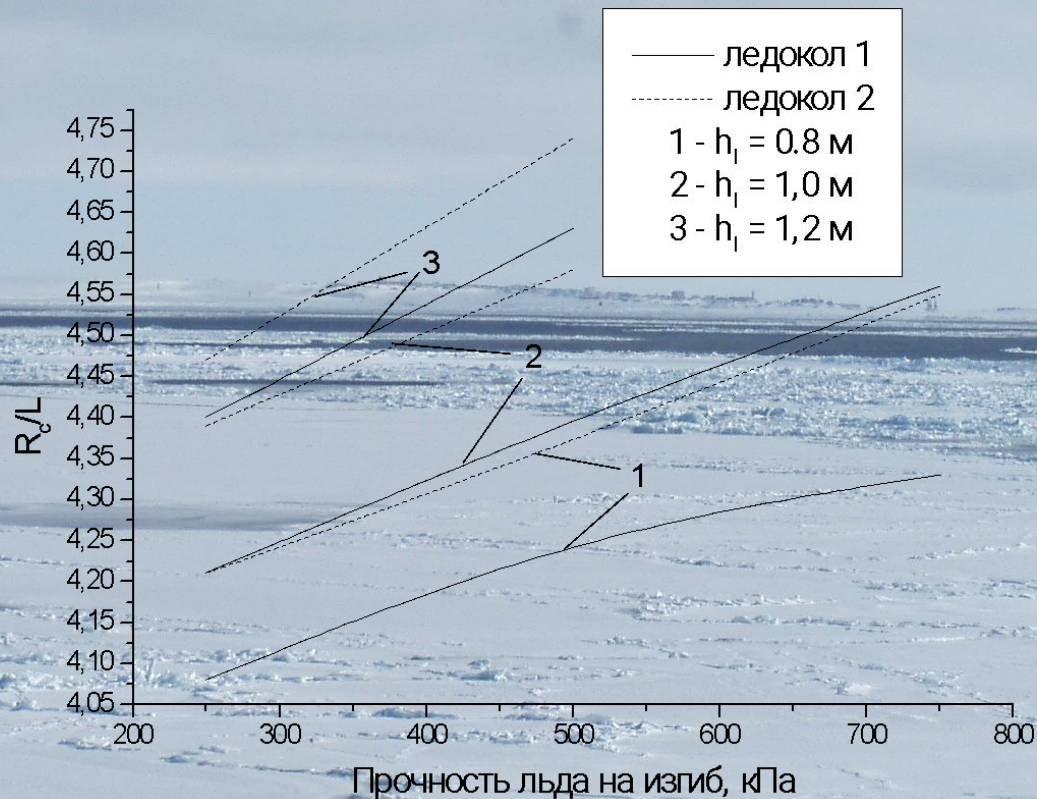
$$T = \frac{\pi R}{v} + ((N-2) t_r)$$

Влияние толщины льда

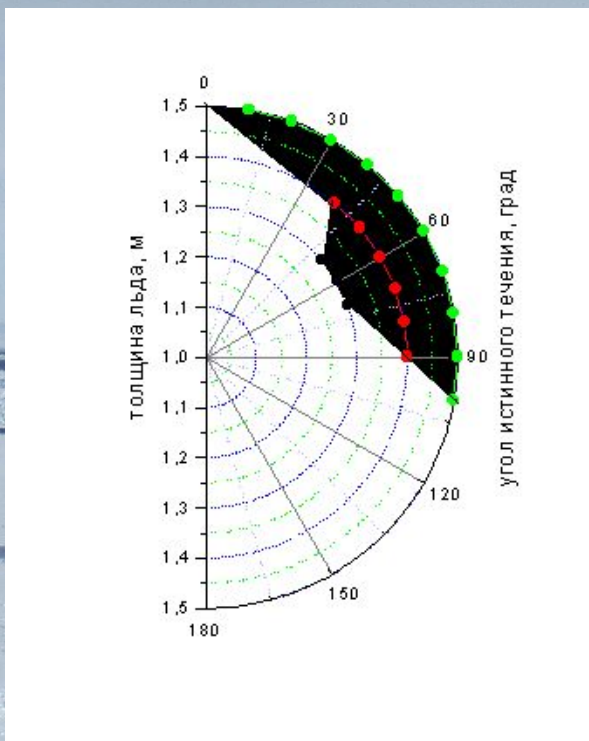
$$\omega < \frac{v_S}{R_{cow}} = \omega_{кр}$$



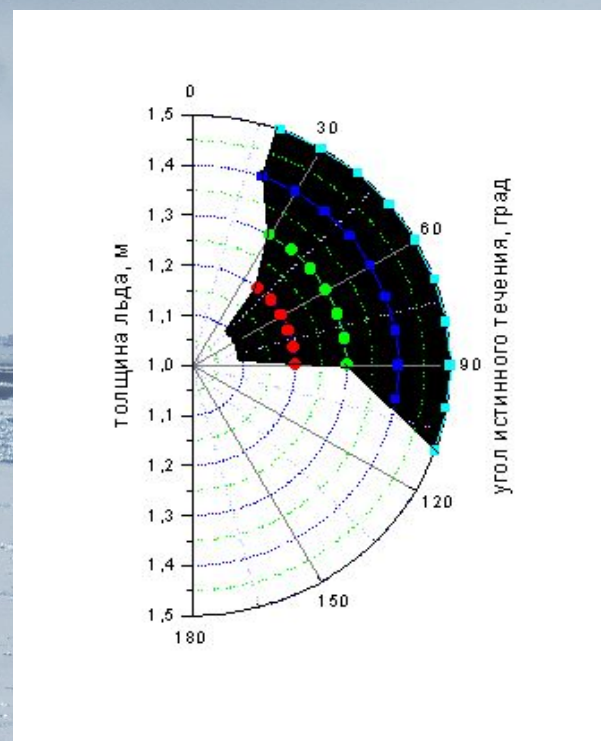
Влияние прочности льда на изгиб



Влияние прочности льда на изгиб

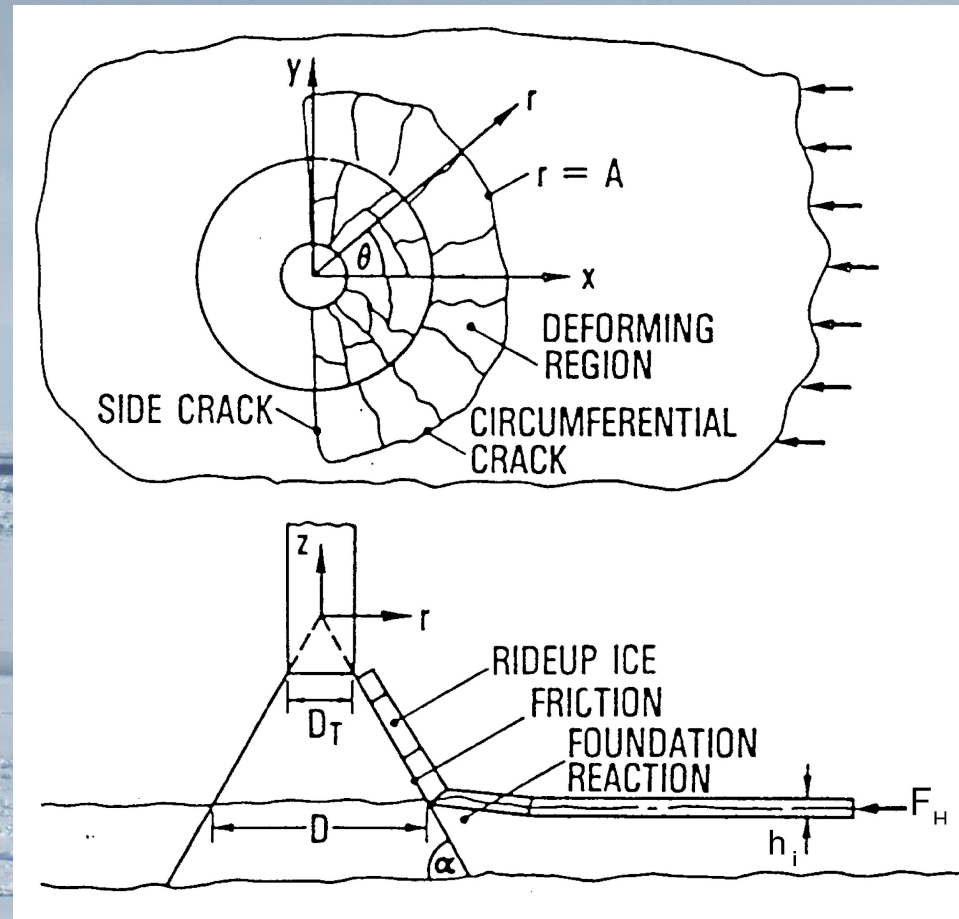


Скорость течения воды подо льдом 4 узла



Скорость течения воды подо льдом 5 узлов

Метод Ралстона

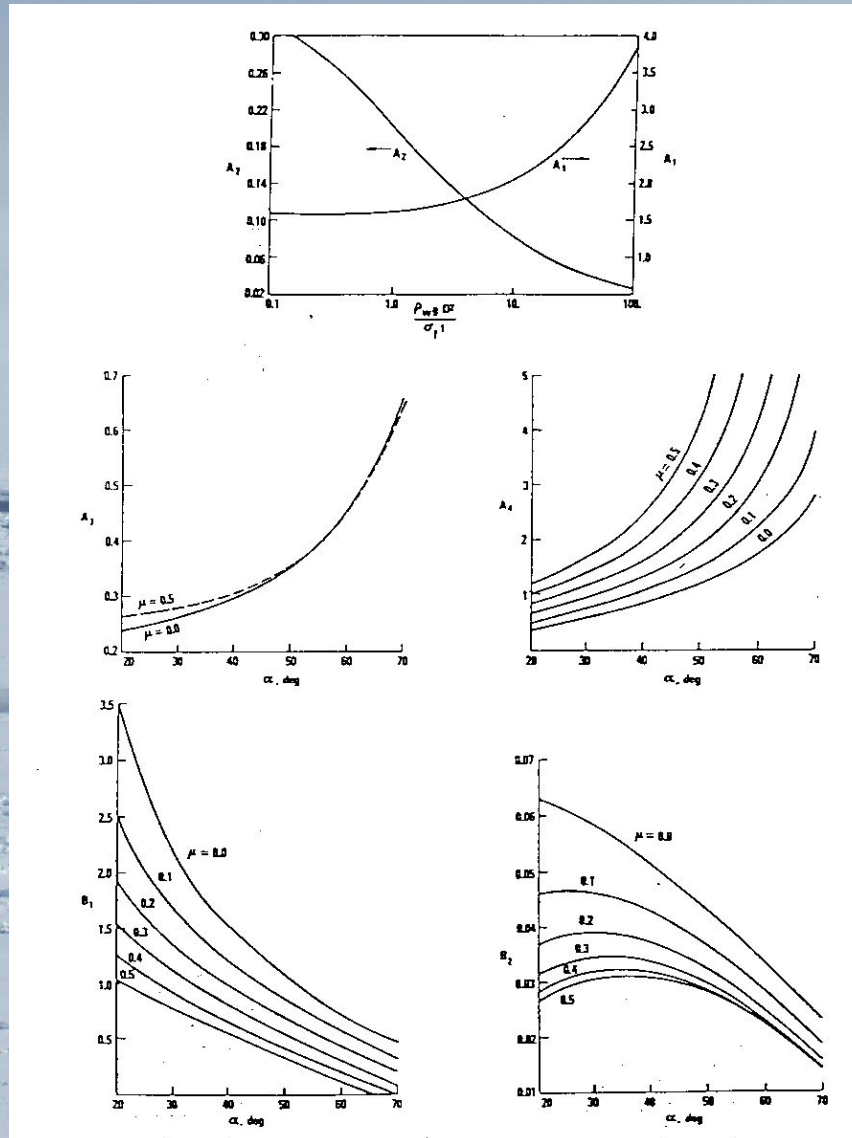


$$F_H = [A_1 \sigma_f h_i^2 + A_2 \rho_w g h_i D^2 + A_3 \rho_w g h_R (D^2 - D_t^2)] A_4$$

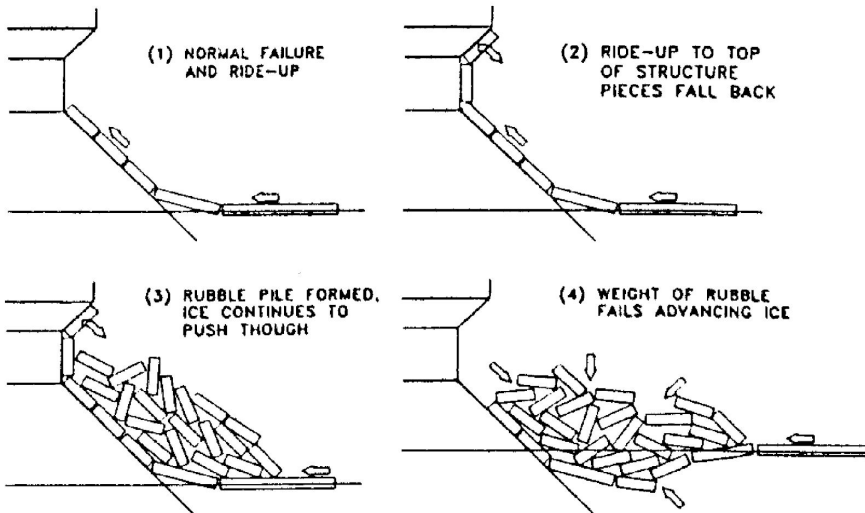
$$F_V = B_1 F_H + B_2 \rho_w g h_R (D^2 - D_t^2)$$

ГЛОБАЛЬНАЯ ЛЕДОВАЯ НАГРУЗКА НА ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Метод Ралстона



Метод Кросдайла

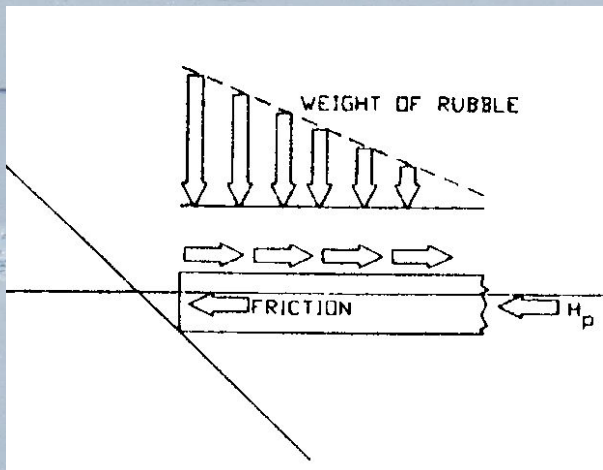


Метод Кросдайла

$$H_{total} = H_b + H_p + H_r + H_l + H_t$$

$$H_b = 0.68\sigma_f (\rho_w g h^5 / E)^{1/4} \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) [D + (\pi^2 / 4)l_c] / D$$

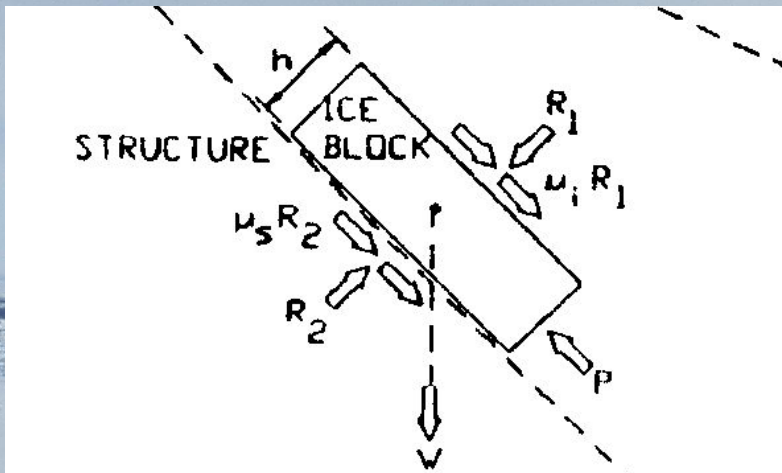
сила, необходимая для ломки ледяного поля изгибом



$$H_p = Dh_r^2 \mu_i \rho_i g (1 - \gamma) (1 - \tan \theta / \tan \alpha)^2 (1 / 2 \tan \theta)$$

сила, необходимая для проталкивания ледяного поля под нагромождением

Метод Кросдайла



$$H_r = \frac{DP}{(\cos \alpha - \mu_s \sin \alpha)}$$

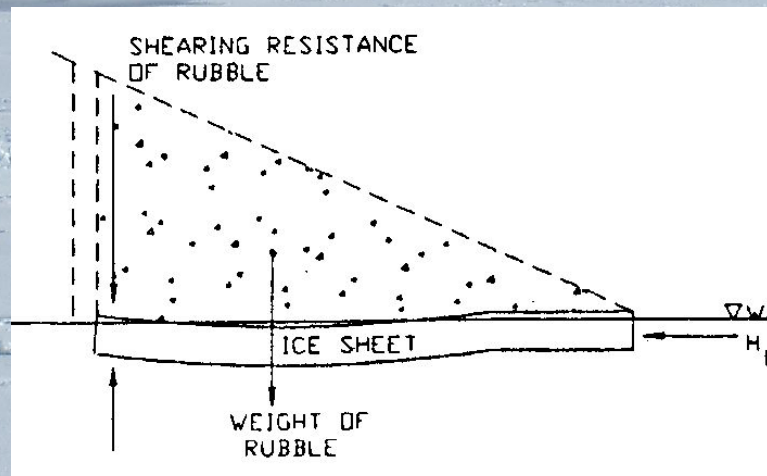
сила, необходимая для проталкивания обломков льда по наклонной поверхности под нагромождением

$$P = 0.5\mu_i(\mu_i + \mu_s)\rho_i g(1 - \gamma)h_r^2 \sin \alpha(1 / \tan \theta - 1 / \tan \alpha)(1 - \tan \theta / \tan \alpha) + 0.5(\mu_i + \mu_s)\rho_i g(1 - \gamma)h_r^2 \cos \alpha(1 / \tan \alpha)(1 - \tan \theta / \tan \alpha) + h_i h_r \rho_i g[(\sin \alpha + \mu_s \cos \alpha) / \sin \alpha]$$

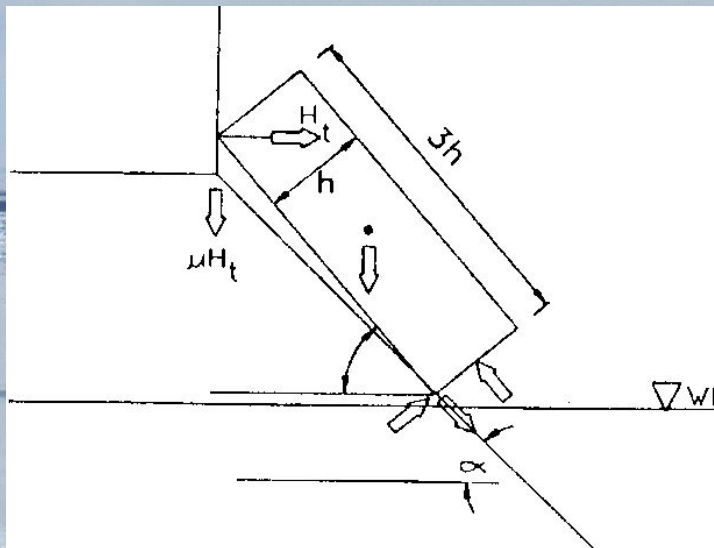
Метод Кросдайла

$$\begin{aligned}
 H_l = & 0.5Dh_r^2 \rho_i g (1 - \gamma) \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) (1 / \tan \theta - 1 / \tan \alpha) (1 - \tan \theta / \tan \alpha) \\
 & + 0.5Dh_r^2 \rho_i g (1 - \gamma) \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) \tan \varphi (1 - \tan \theta / \tan \alpha)^2 \\
 & + cDh_r \left(\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) (1 - \tan \theta / \tan \alpha)
 \end{aligned}$$

сила, необходимая для поддержания нагромождения обломков льда перед сооружением до разрушения ледяного поля



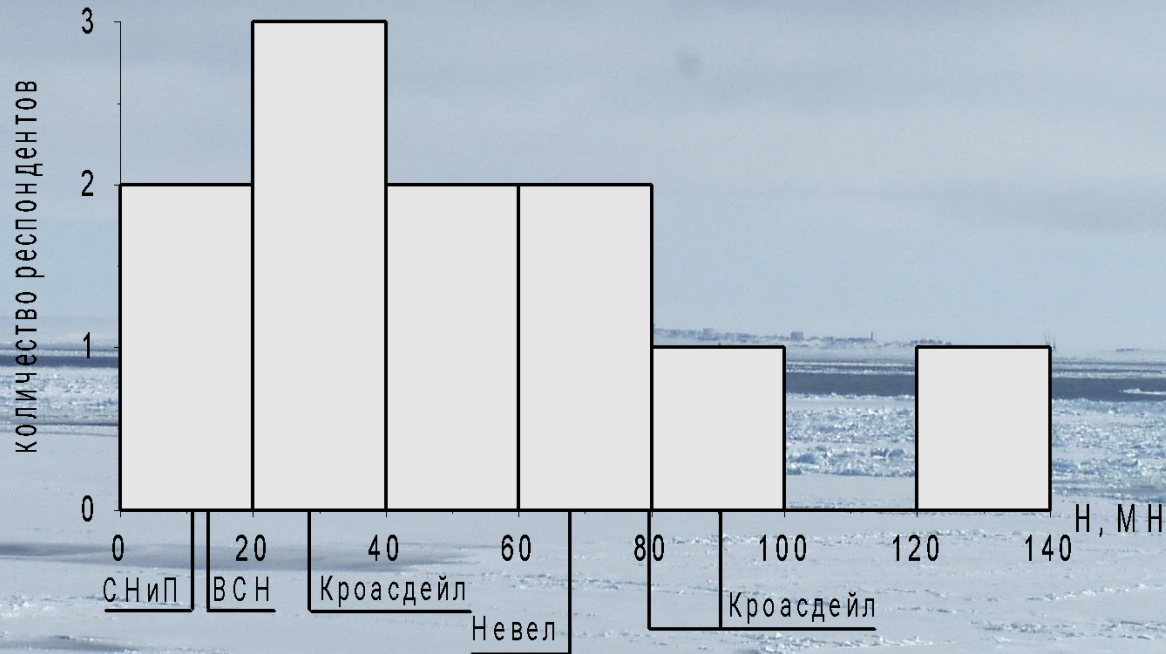
Метод Кросдайла



$$H_t = 1.5 D h_i^2 \rho_i g [\cos \alpha / (\sin \alpha - \mu_s \cos \alpha)]$$

сила, необходимая для разворота блоков льда при переходе наклонной поверхности сооружения в вертикальную

Сравнение



Гистограмма нагрузок от ровного льда на наклонное сооружение

Спасибо за внимание!

