



**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р. Е. Алексеева**

**кафедра «Кораблестроение
и авиационная техника»**

**Исследование параметров
моделирования ледового
сопротивления судов в композитной
модели ледяного покрова**

**Себин А. С., Блинов К. Д.,
Двойченко Ю. А.**

докладчик: Себин Андрей Сергеевич

2023

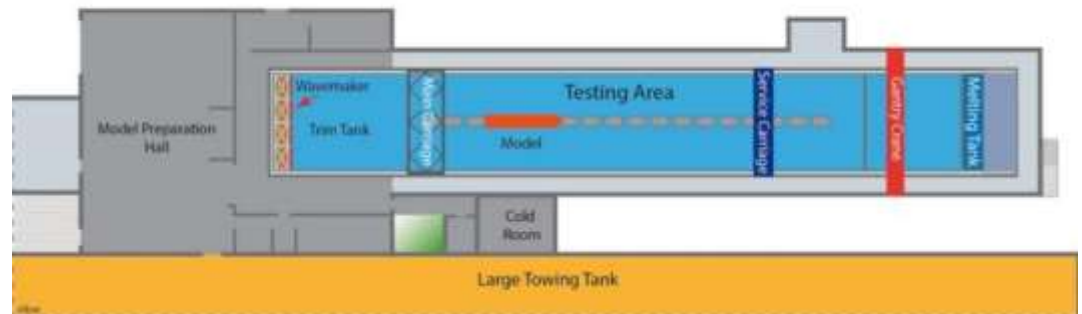
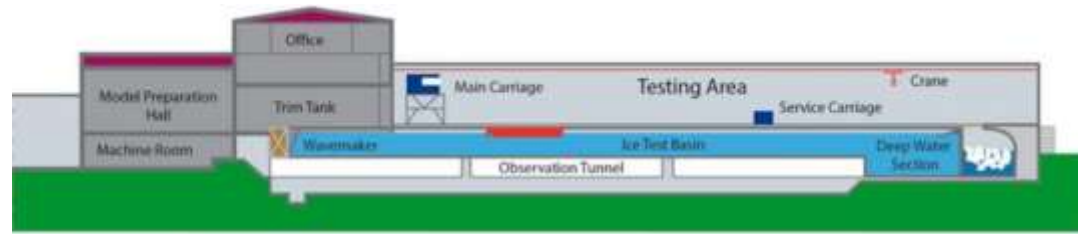
Ледовые опытовые бассейны

Средние размеры:

- 1-е поколение $8 \times 2 \times 1$ м
- 2-е поколение $30 \times 6 \times 1,5$ м
- 3-е поколение $70 \times 10 \times 2$ м
 $40 \times 40 \times 2$ м

По назначению:

- Коммерческие
- Корпоративные
- Исследовательские
- Малые опытовые бассейны для фундаментальных исследований



Условия моделирования. Классический подход

$$\frac{L_H}{L_M} = \lambda \quad \frac{v_H}{v_M} = \sqrt{\lambda} \quad \rho_M^l = \rho_H^l \quad \rho_M^g = \rho_H^g \quad f_H = f_M \quad \frac{P_H}{P_M} = \lambda^3$$

подобие механических сил

$$\frac{h_H}{h_M} = \frac{\sigma_H}{\sigma_M} = \frac{E_H}{E_M} = \lambda \quad \mu_H = \mu_M$$

**метод
Ногида-Шиманского**

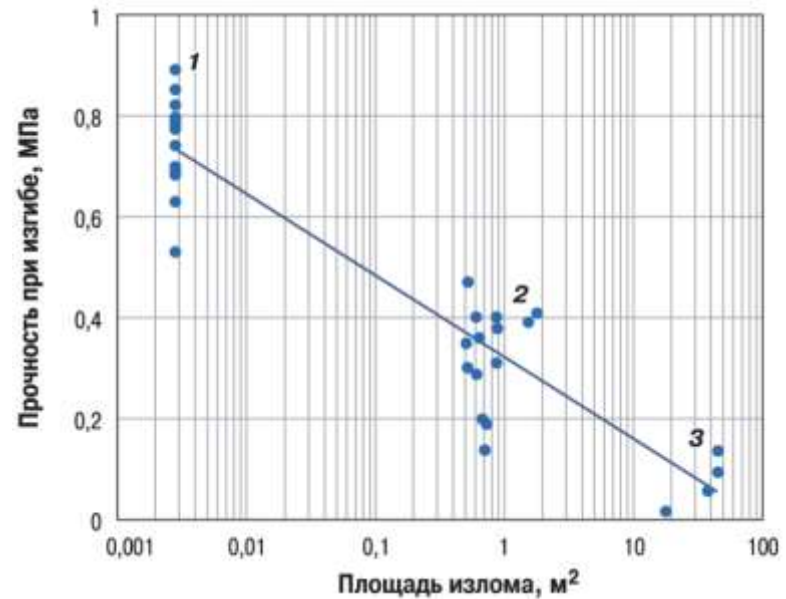
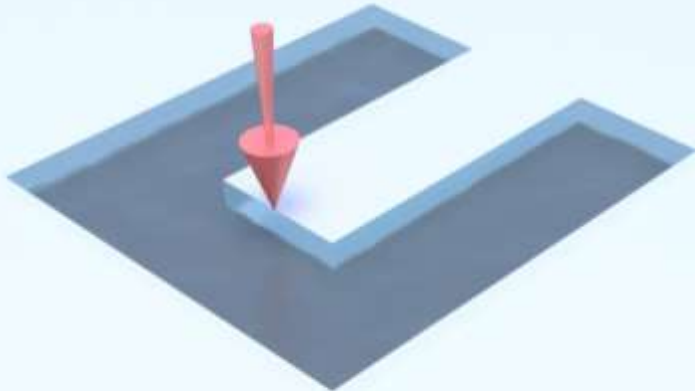
$$\frac{E_M}{\sigma_M} = \frac{E_H}{\sigma_H} = \lambda \quad \text{метод Шварца}$$

**Общая формула корректировки
по методике МКОб:**

$$R_{1,corr} = R_{I,meas} \left[(1 - a_\sigma) + a_\sigma \frac{\sigma_{f,target}}{\sigma_{f,meas}} \right] \left(\frac{h_{target}}{h_{meas}} \right)^x = R_{I,meas} C_\sigma C_h$$

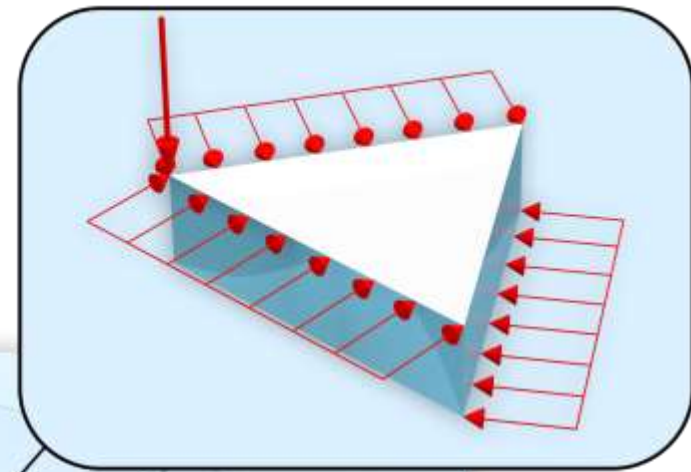
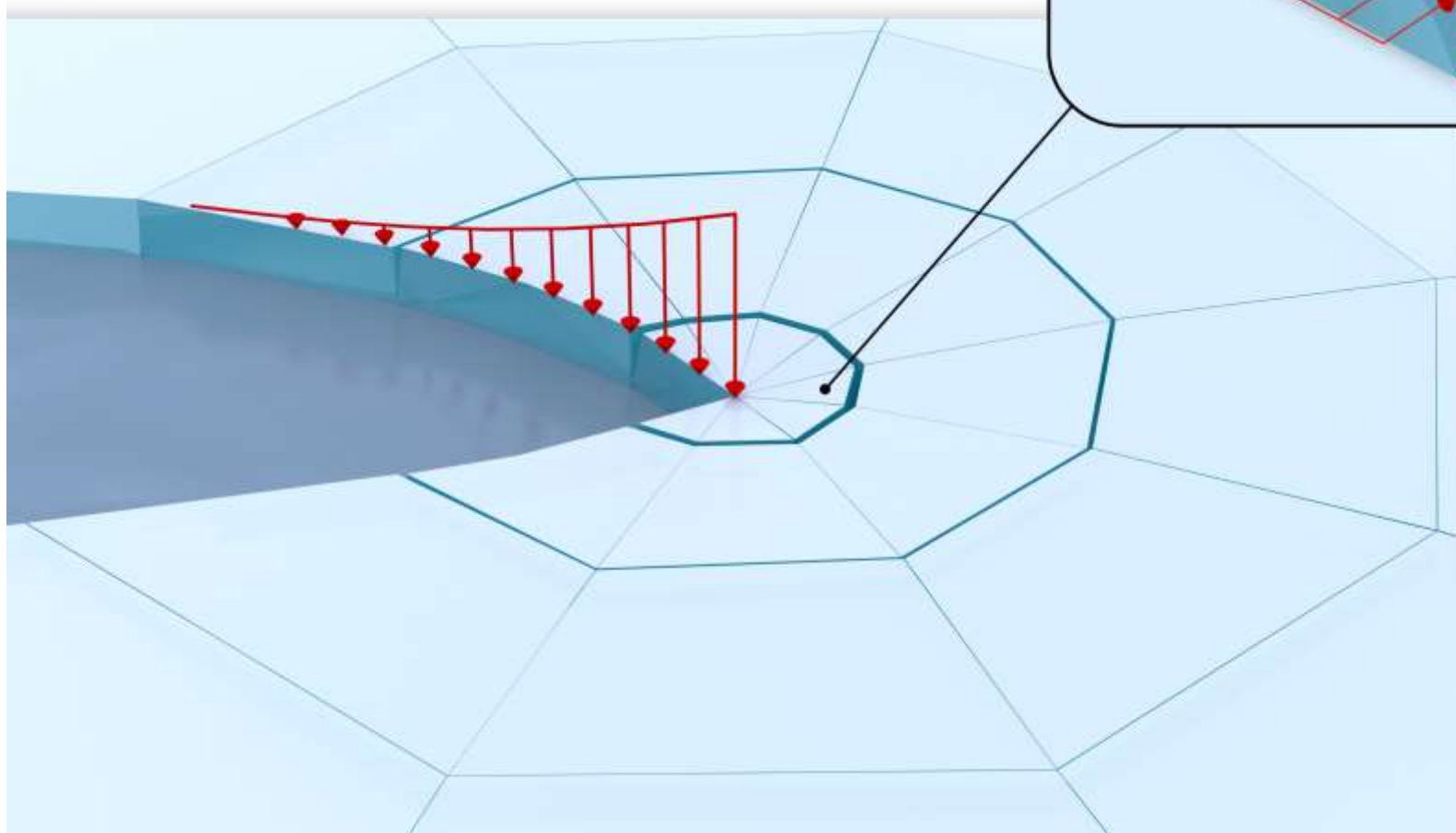
C_σ, C_h - поправочные коэффициенты по прочности
и толщине льда

**стандартный опыт по облому
консольной балки на плаву**



Корнишин К. А. и др. Опыт крупномасштабных испытаний прочности ледяных полей на изгиб в Карском море и море Лаптевых // Научно-технический вестник ОАО "НК" Роснефть". - 2016. - №. 2. - С. 85-89.

Натурный ледяной покров



Метод функционального подобия

$$R = R_p + R_{obl}$$

R_p сопротивление разрушения поля льда: ломка ледяной пластины, разрушение кромки, трение о кромку неразрушенного льда

R_{obl} сопротивление обломков льда: поворачивание, раздвигание, притапливание обломков, трение обломков о корпус



$$f_n : (X_n)^n \rightarrow Y_n$$

Метод функционального подобия

$$R = R_p + R_{обл}$$

R_p сопротивление разрушения поля льда: ломка ледяной пластины, разрушение кромки, трение о кромку неразрушенного льда

$R_{обл}$ сопротивление обломков льда: поворачивание, раздвигание, притапливание обломков, трение обломков о корпус



$$f_n : (X_n)^n \rightarrow Y_n$$

$$f_m : (X_m)^m \rightarrow Y_m$$

$X_{n,m}$ $Y_{n,m}$ множества «входов» и «выходов» природы и модели

$S_{n,m}$ множество параметров судна

$E_{n,m}$ множество параметров окружающей среды

$I_{n,m}$ множество параметров льда



$$X = S \cup E \cup I$$

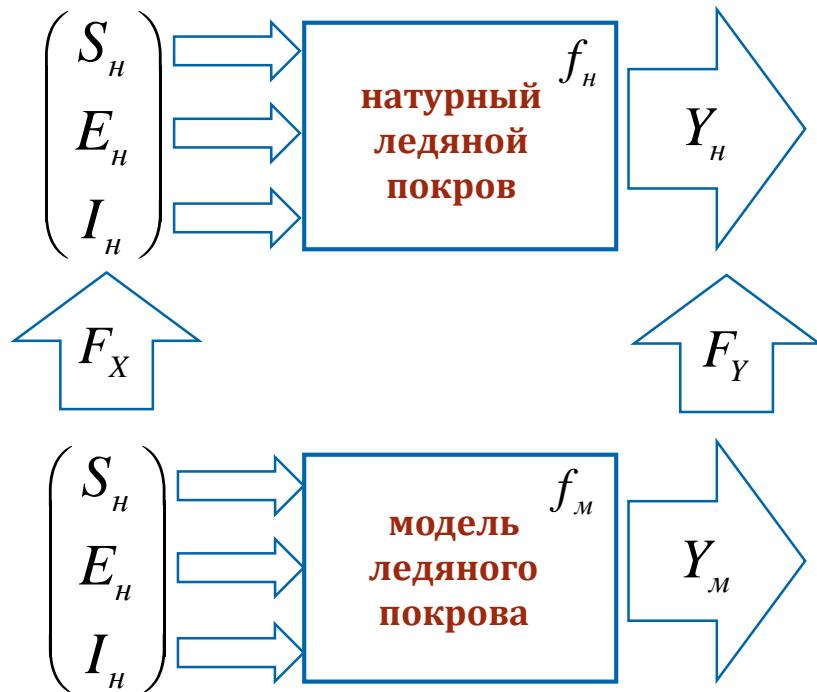
$$Y = \{ F_{кр}, w_{кр}, w_{max}, A_{кр}, A_{закр}, A_{tot}, k_{кр}, k_{закр}, k_{tot} \}$$

Метод функционального подобия

$$R = R_p + R_{obl}$$

R_p сопротивление разрушения поля льда: ломка ледяной пластины, разрушение кромки, трение о кромку неразрушенного льда

R_{obl} сопротивление обломков льда: поворачивание, раздвигание, притапливание обломков, трение обломков о корпус



$$F_X : X_m \rightarrow X_n$$

$$F_Y : Y_m \rightarrow Y_n$$

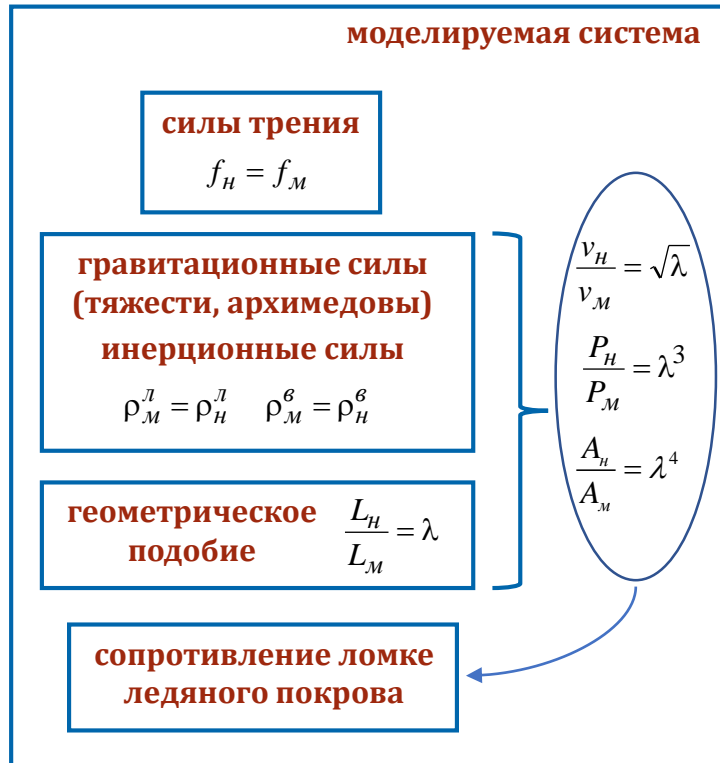
$$f_n : F_X(X_m) \rightarrow F_Y(Y_m)$$

Метод функционального подобия

$$R = R_p + R_{obl}$$

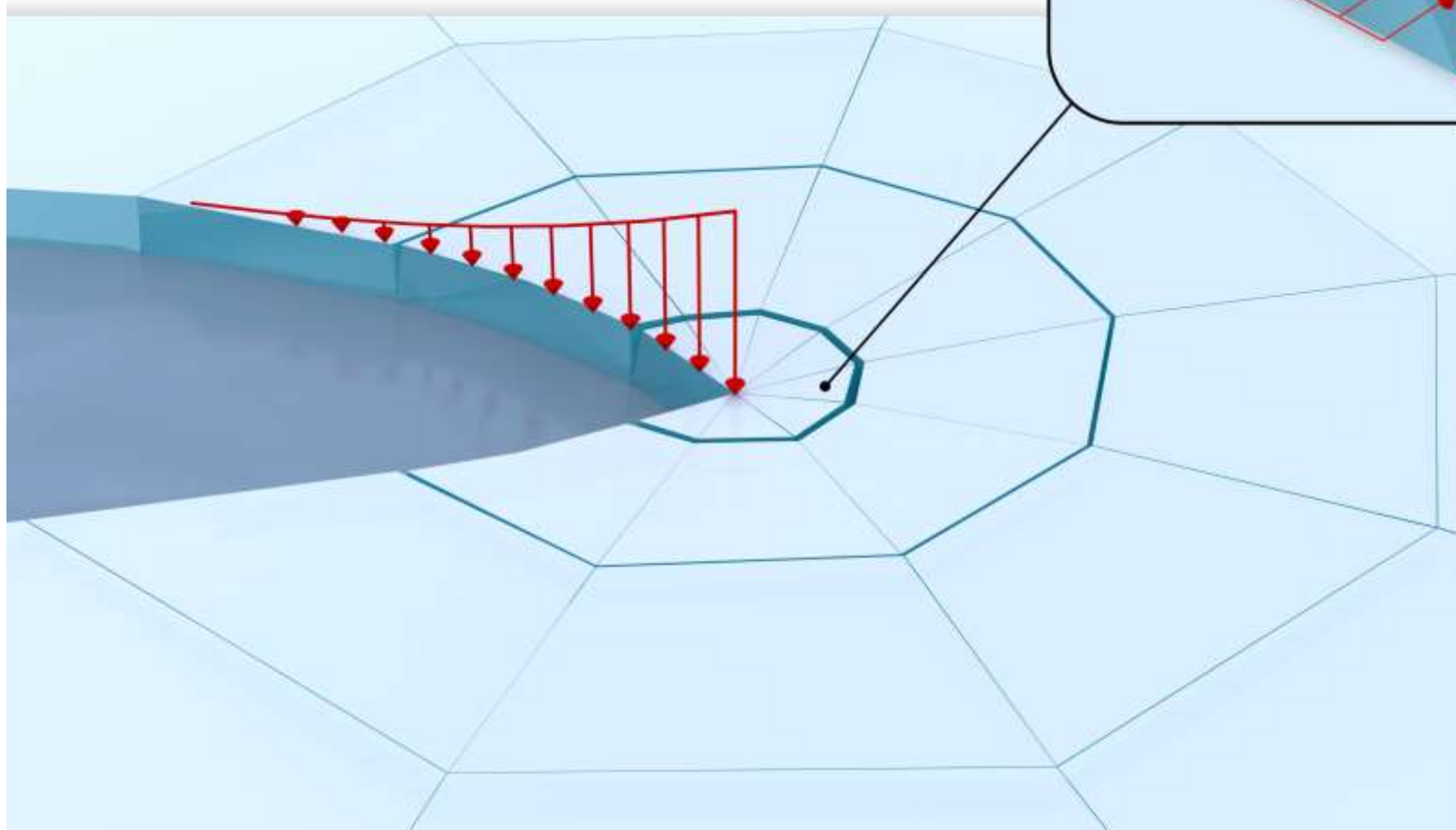
R_p сопротивление разрушения поля льда: ломка ледяной пластины, разрушение кромки, трение о кромку неразрушенного льда

R_{obl} сопротивление обломков льда: поворачивание, раздвигание, притапливание обломков, трение обломков о корпус



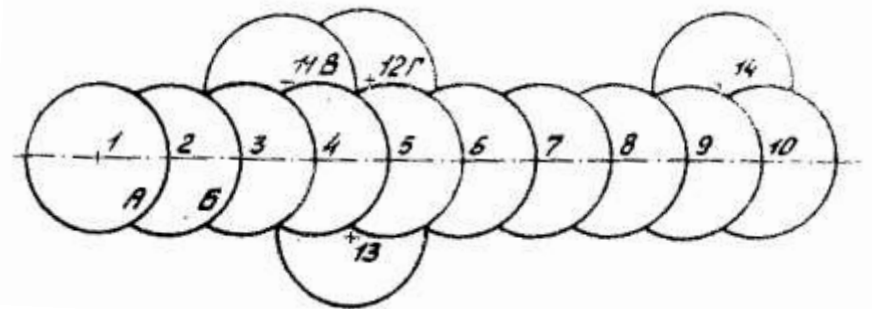
Натурный ледяной покров

Тестовый опыт?



Разрушение натурального льда

Опыты Двойченко-Грамузова



Разрушение натурального льда

Опыты Двойченко-Грамузова

Характерный вид диаграммы разрушения натурального ледяного покрова



$F_{кр}$ критическое разрушающее усилие

$w_{кр}$ критический прогиб льда в месте нагружения

w_{max} максимальный прогиб льда в месте нагружения

$A_{кр}$ критическая работа разрушения

$A_{закр}$ закритическая работа разрушения

$A_{tot} = A_{кр} + A_{закр}$ работа разрушения всего процесса

$k_{кр} = \frac{A_{кр}}{F_{кр} w_{кр}}$ коэффициент формы критической части диаграммы

$k_{закр} = \frac{A_{закр}}{F_{кр} (w_{max} - w_{кр})}$ коэффициент формы критической части диаграммы

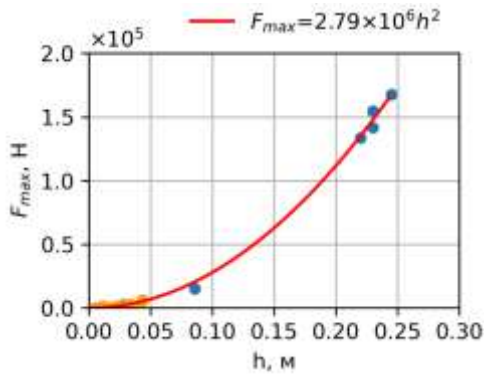
$k_{tot} = \frac{A_{tot}}{F_{кр} w_{max}}$ коэффициент формы всей диаграммы разрушения

Вклад докритической части в общие энергетические затраты $k_{A/A} = \frac{A_{кр}}{A_{tot}}$

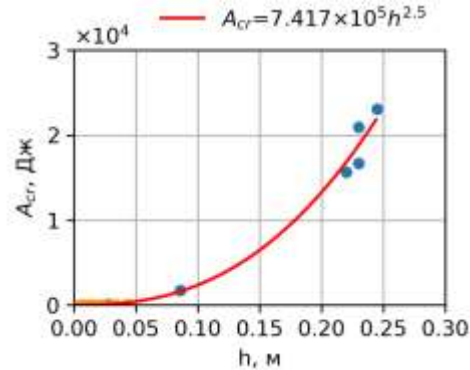
Разрушение натурального льда

Опыты Двойченко-Грамузова и опыты Князькова

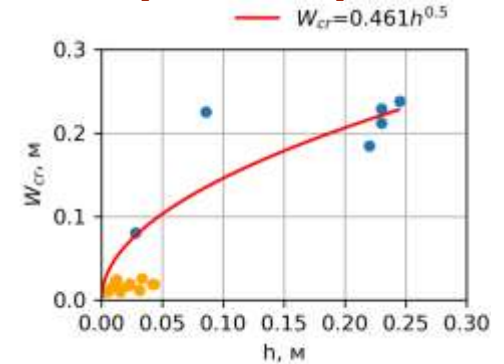
Критическое усилие



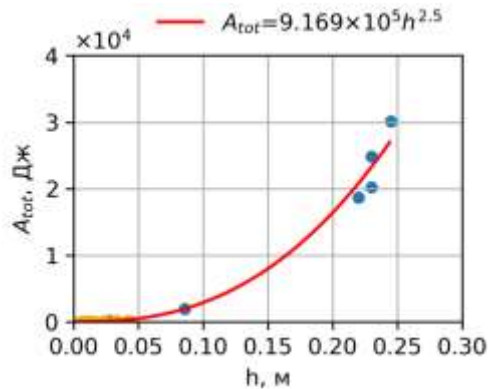
Критическая работа



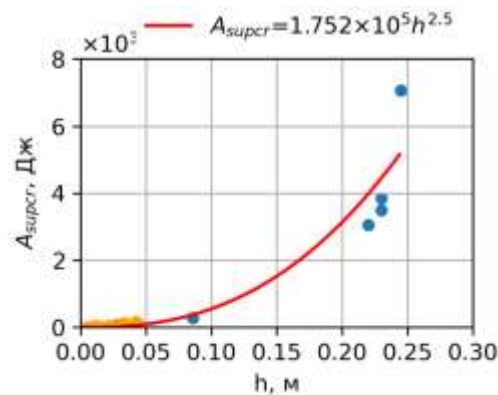
Критический прогиб



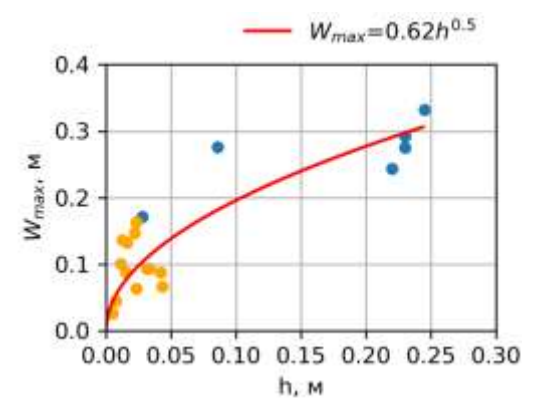
Общая работа разрушения



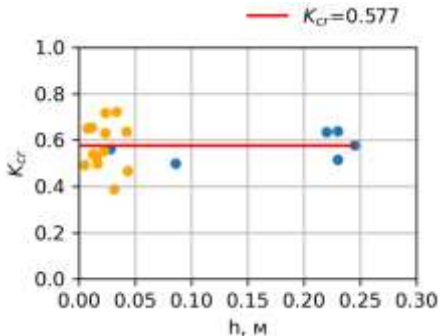
Закритическая работа



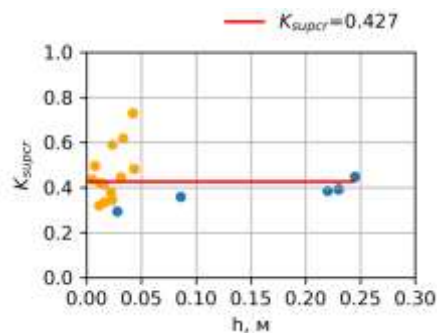
Максимальный прогиб



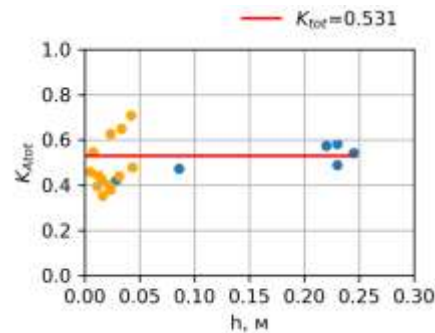
Коэффициент формы критической части



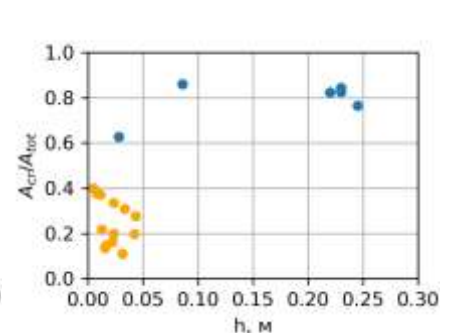
Коэффициент формы закритической части



Коэффициент формы всей диаграммы разрушения



Вклад докритической части в общие энергетические затраты

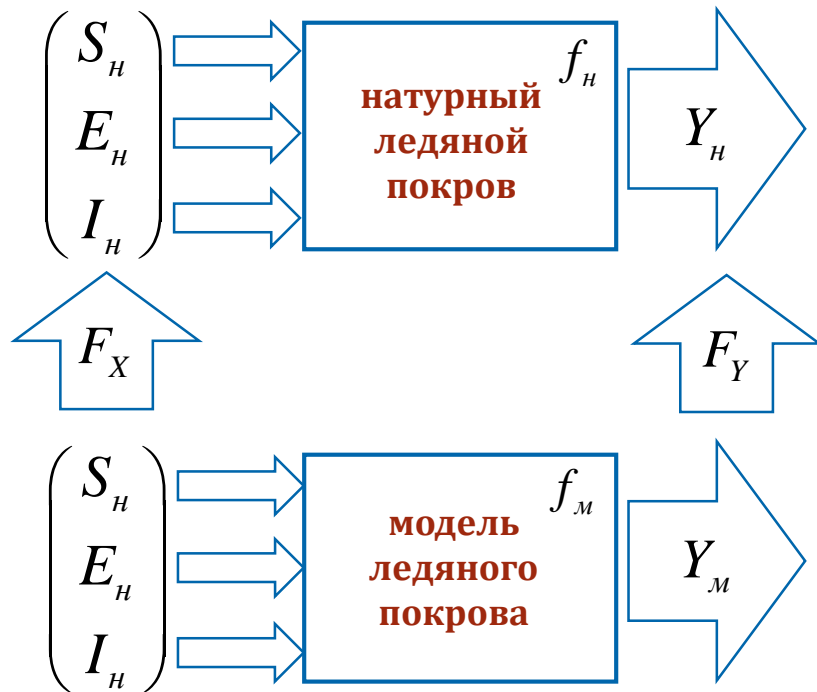


Метод функционального подобия

$$R = R_p + R_{обл}$$

R_p сопротивление разрушения поля льда: ломка ледяной пластины, разрушение кромки, трение о кромку неразрушенного льда

$R_{обл}$ сопротивление обломков льда: поворачивание, раздвигание, притапливание обломков, трение обломков о корпус



$$F_X : X_m \rightarrow X_n$$

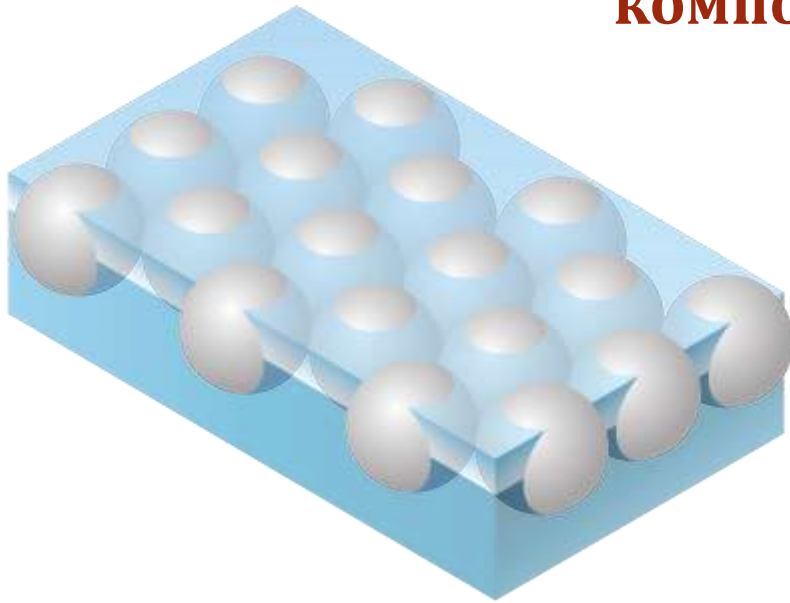
$$F_Y : Y_m \rightarrow Y_n$$

$$f_n : F_X(X_m) \rightarrow F_Y(Y_m)$$

$$\lambda = f_\lambda(X_m) \quad \text{или} \quad \lambda = f_\lambda(h_m)$$

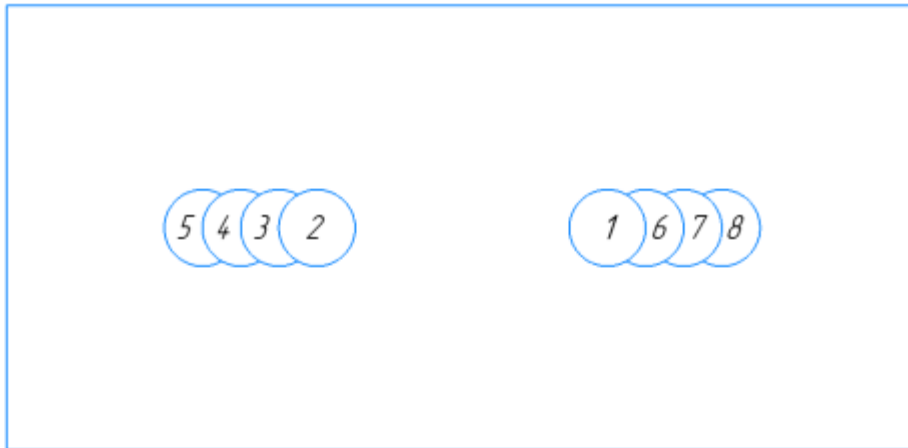
$$\lambda = \left(\frac{k_n}{k_m} \cdot h_m^{n-m} \right)^{1/q-1}$$

Исследование процесса разрушения КОМПОЗИТНОГО ЛЬДА



Измерение глубины проморозки гранул

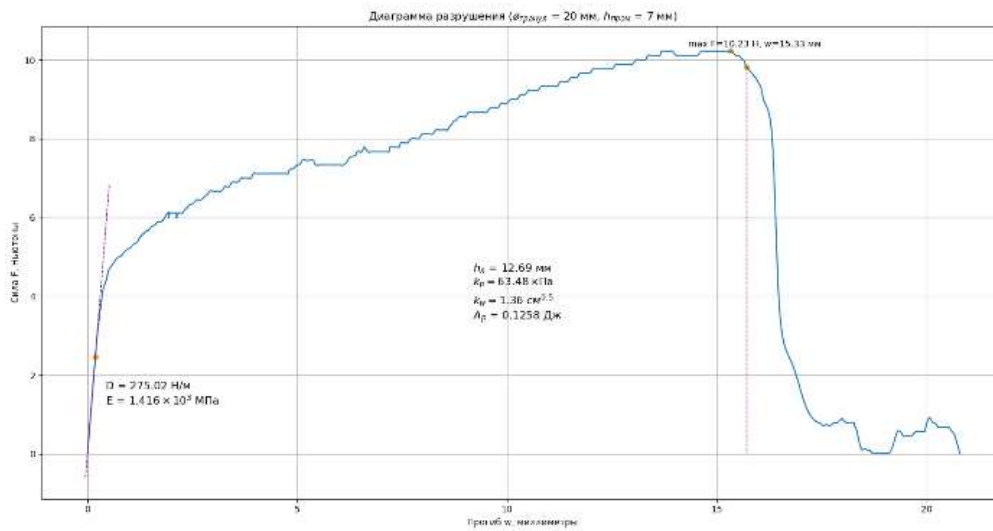
Схема проведения эксперимента



Исследование процесса разрушения КОМПОЗИТНОГО ЛЬДА



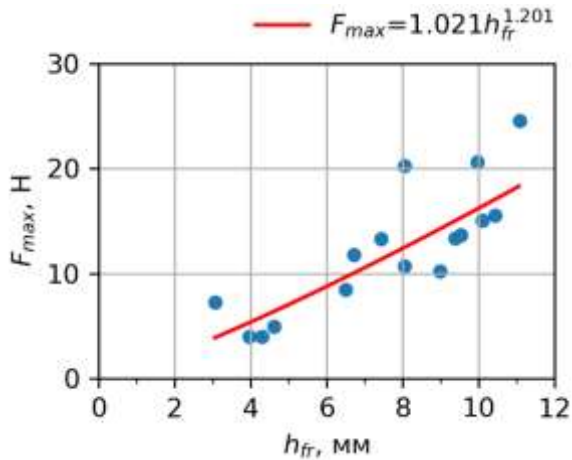
20 мм 1 слой



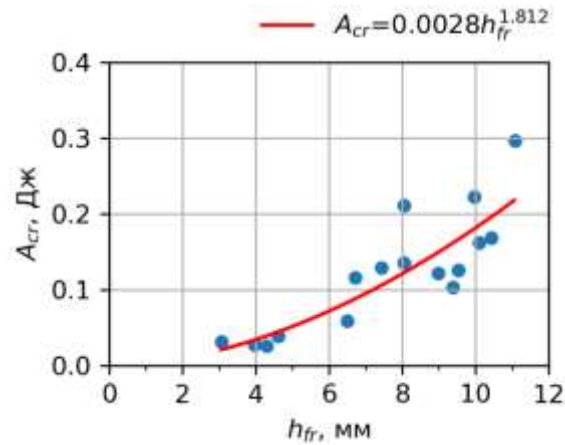
Типичный вид диаграммы разрушения
однослойного композитного льда из
шаровых гранул диаметром 20 мм

Исследование процесса разрушения КОМПОЗИТНОГО ЛЬДА

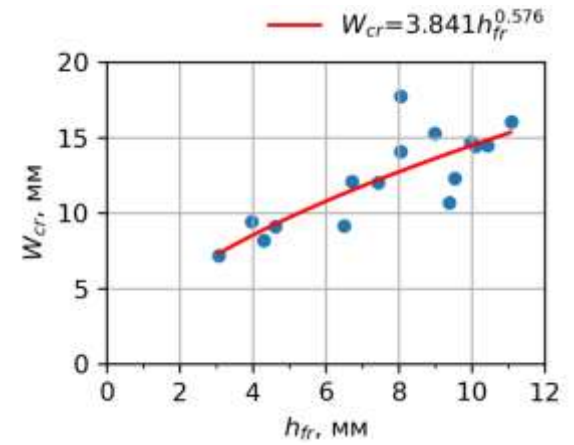
Критическое усилие



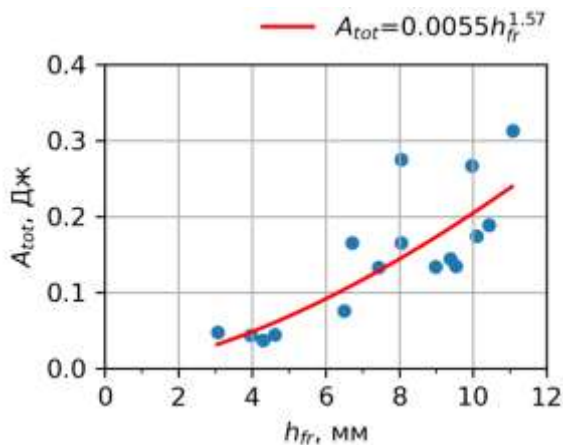
Критическая работа



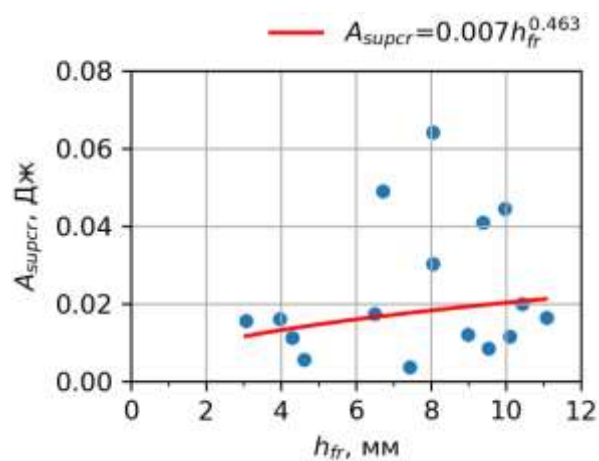
Критический прогиб



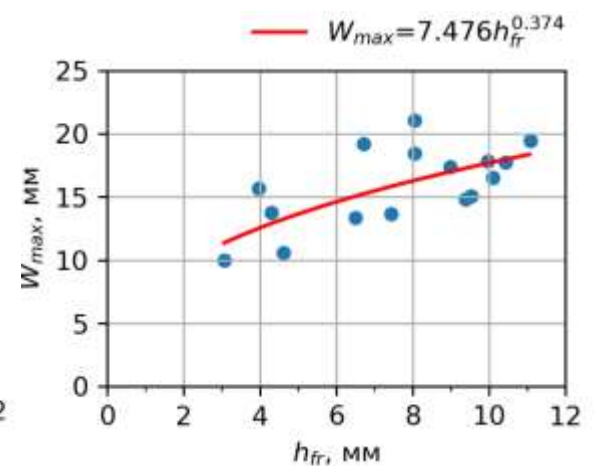
Общая работа разрушения



Закритическая работа

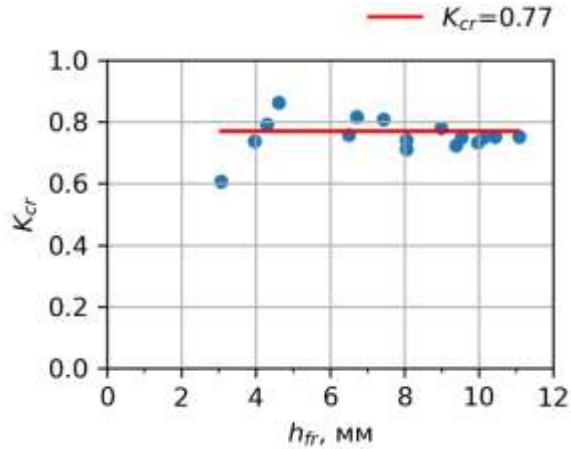


Общий прогиб

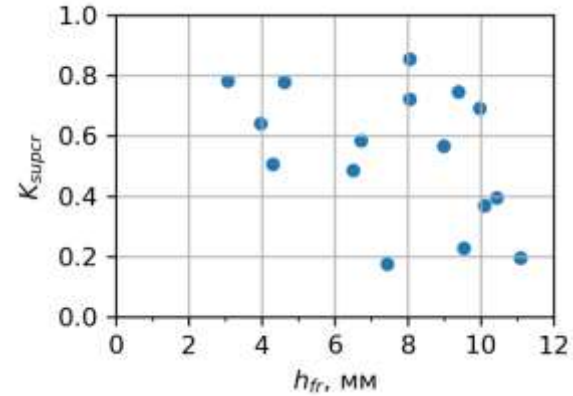


Исследование процесса разрушения КОМПОЗИТНОГО ЛЬДА

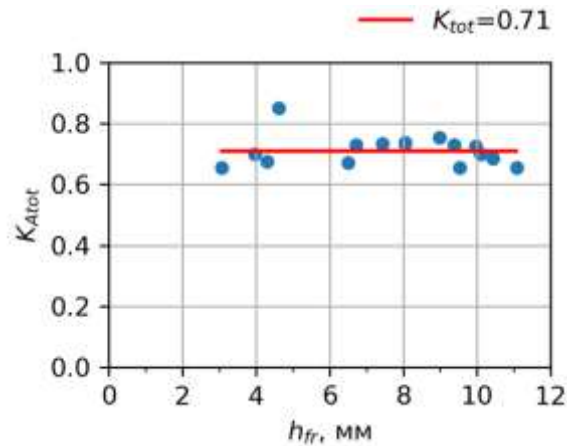
Коэффициент формы
критической части



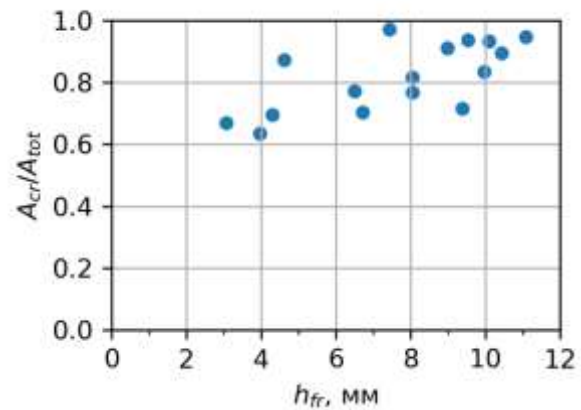
Коэффициент формы
закритической части



Коэффициент формы всей
диаграммы разрушения

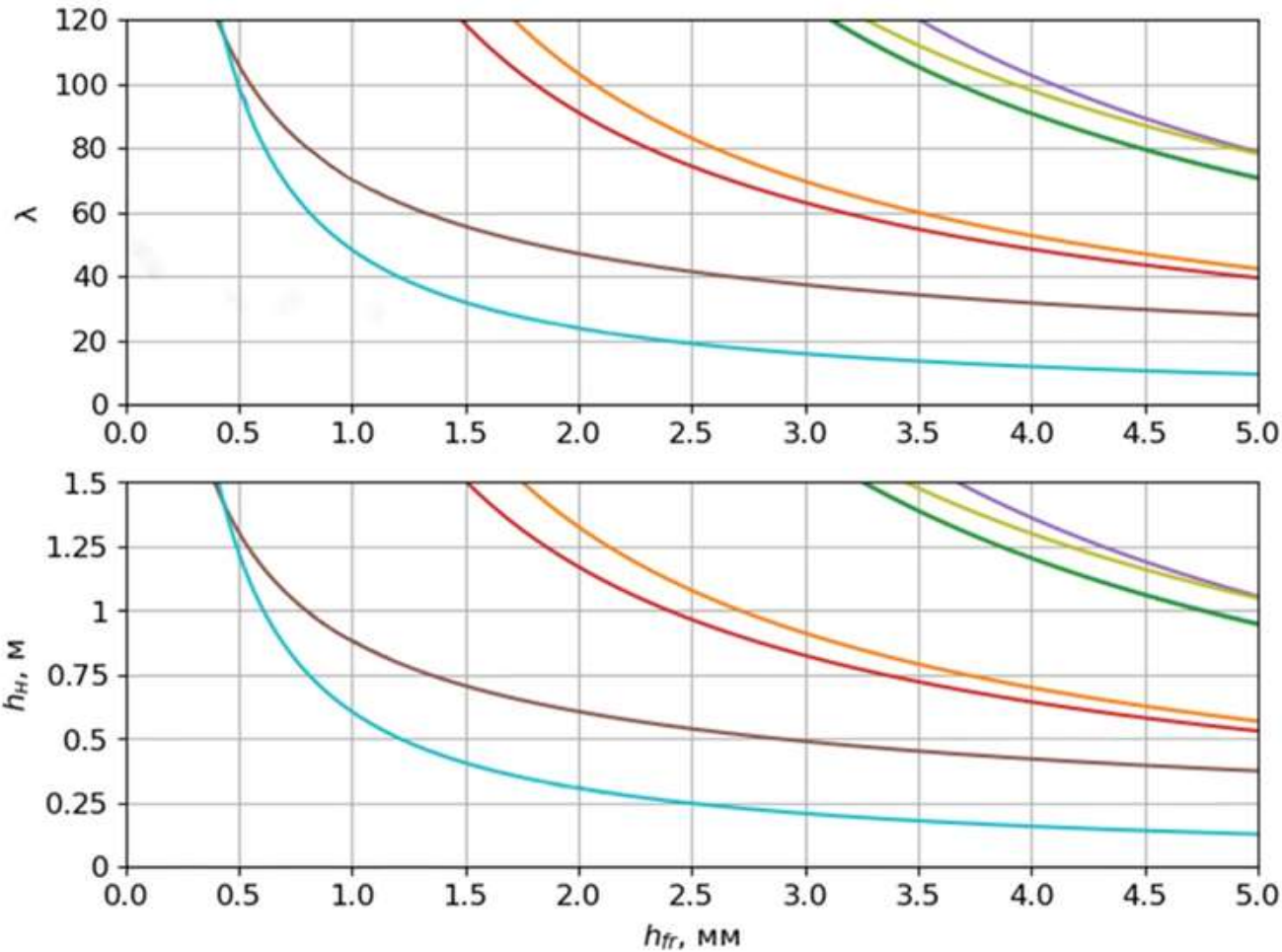


Отношение величины критической
работы к общей работе разрушения



Исследование процесса разрушения КОМПОЗИТНОГО ЛЬДА

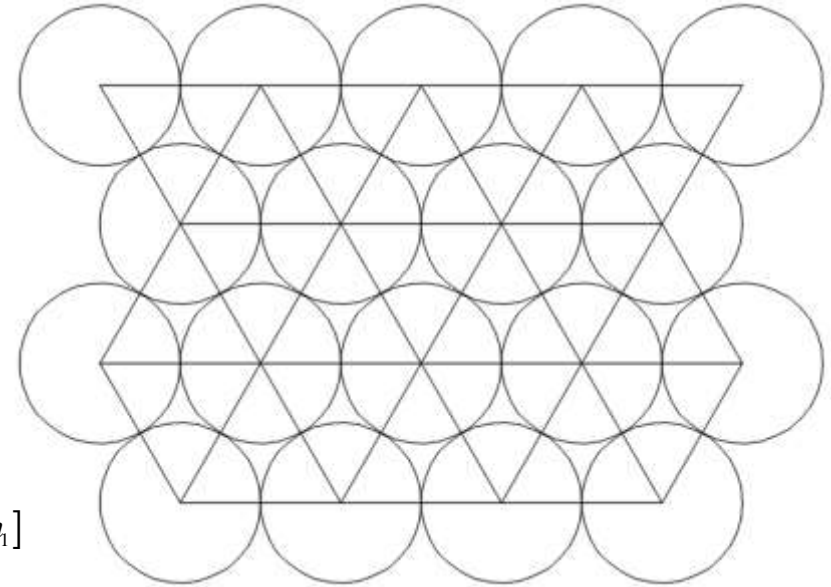
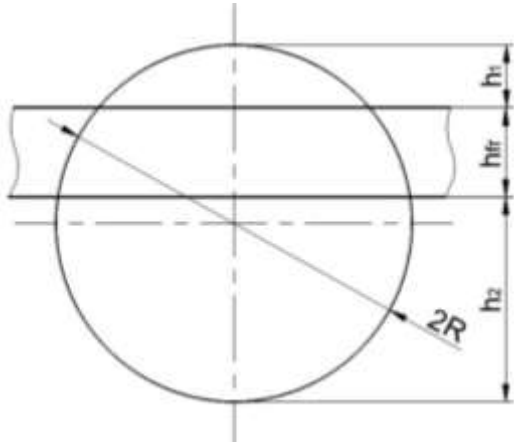
— F_{max} все кан — F_{max} 2 кан — F_{max} 1 кан — F_{max} ЦП
— A_{tot} все кан — A_{tot} 2 кан — A_{tot} 1 кан — A_{tot} ЦП



$$\lambda = \left(\frac{k_H}{k_M} \cdot h_M^{n-m} \right)^{1/q-1}$$

Геометрические параметры композитного льда

Однослойная укладка сферических гранул



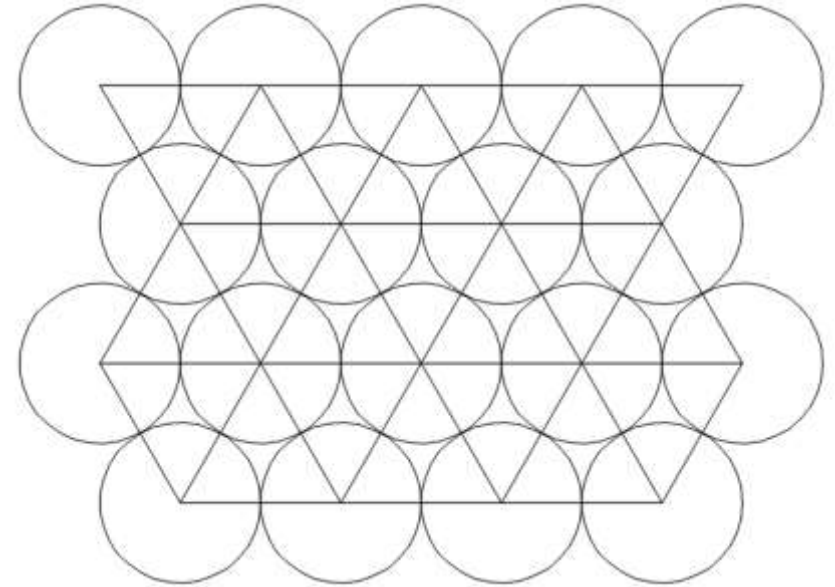
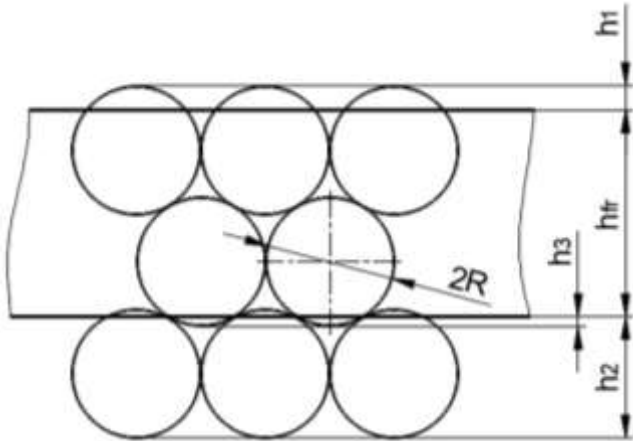
$$h_{np} = h_{fr} + \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left[\frac{R}{3} \left[4 + \frac{(h_1 + h_{fr})^3 - h_1^3}{R^3} \right] - \frac{2h_1 h_{fr} + h_{fr}^2}{R} \right], \text{ при } h_{fr} \in [0; 2R - h_1]$$

$$h_{np} = h_{fr} + \frac{\pi h_1^2}{6\sqrt{3}R^2} (3R - h_1), \text{ при } h_{fr} \geq 2R - h_1$$

$$\rho_* = \frac{\rho_{cp}}{\rho_e}$$

Геометрические параметры композитного льда

Многослойная укладка сферических гранул



$$h_{np} = h_{fr} + \frac{V_1 + V_2 + V_3}{2R^2\sqrt{3}}$$

$$h_1 = \text{Re} \left[R \cdot \frac{(A-1) \left[(i\sqrt{3}+1)(A+1) - 2A \right]}{2A} \right],$$

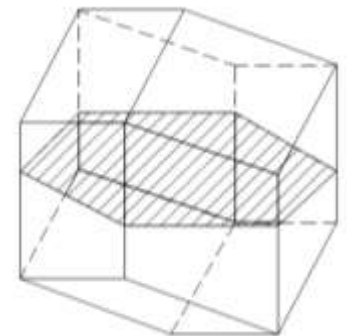
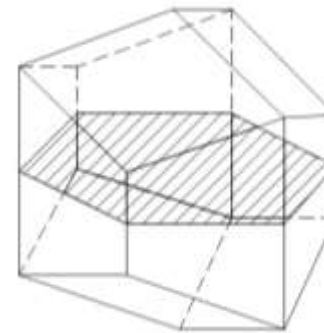
$$\rho_* = \frac{\rho_{cp}}{\rho_e}$$

$$A = \left[1 + 2N(\rho_* - 1) \left(\sqrt{1 + N^{-1}(\rho_* - 1)^{-1}} + 1 \right) \right]^{1/3}$$

$$V_1 = N \frac{4}{3} \pi R^3 (1 - \rho_*)$$

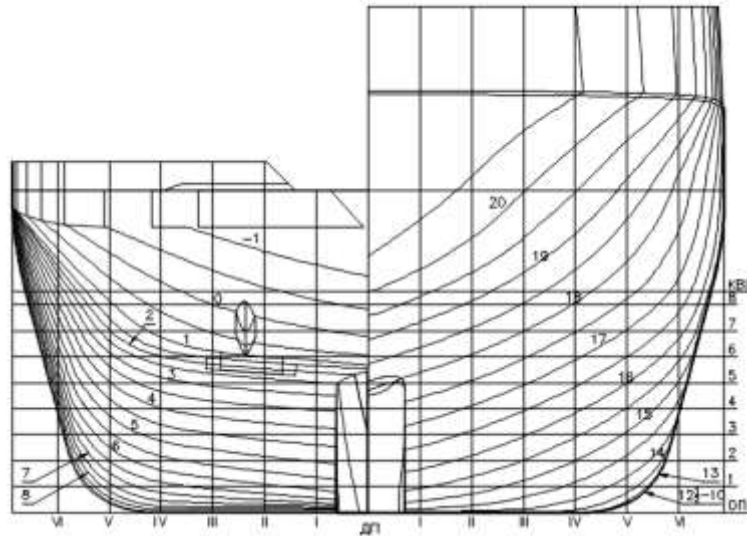
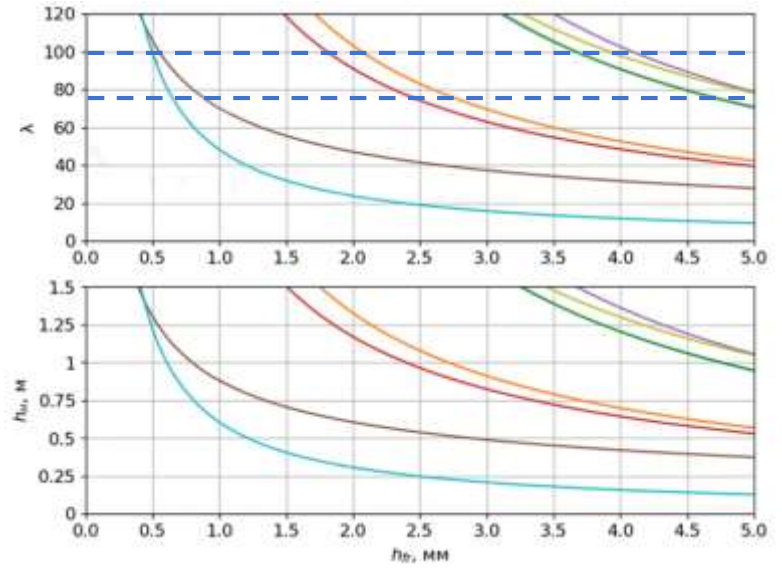
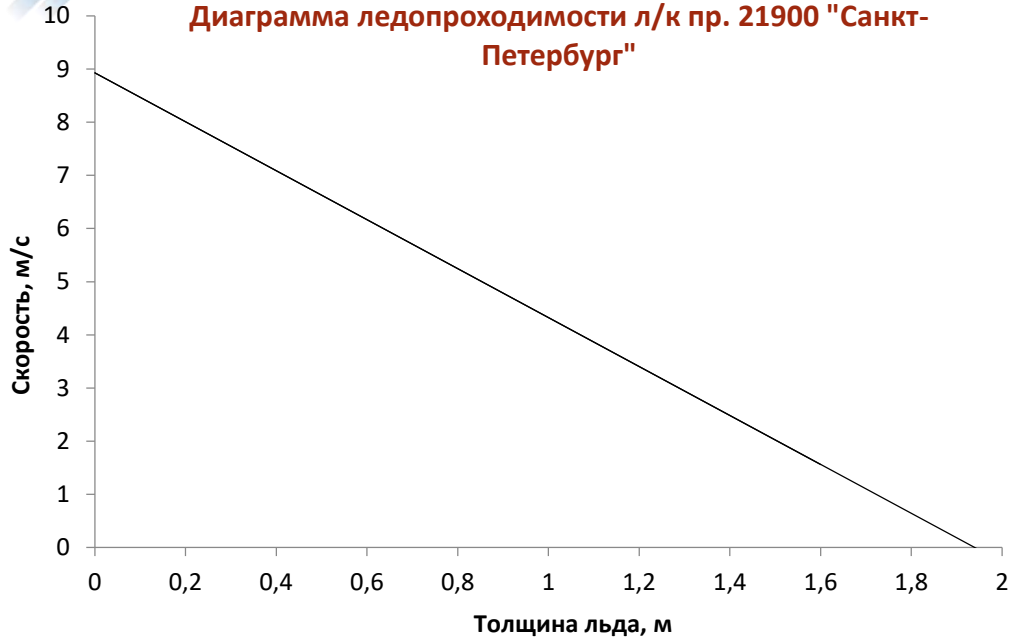
$$V_2 = \frac{\pi}{81} \cdot \left[2\sqrt{6}R(1-N) + 3(h_1 - 2R + h_{fr}) \right]^2 \left[2\sqrt{6}R(1-N) + 3(h_1 + R + h_{fr}) \right]$$

$$V_3 = \frac{\pi}{81} \cdot \left[2\sqrt{6}R(2-N) + 3(h_1 - 2R + h_{fr}) \right]^2 \left[2\sqrt{6}R(2-N) + 3(h_1 + R + h_{fr}) \right]$$



Модельные испытания л/к пр. 21900

Диаграмма ледопроеходимости л/к пр. 21900 "Санкт-Петербург"



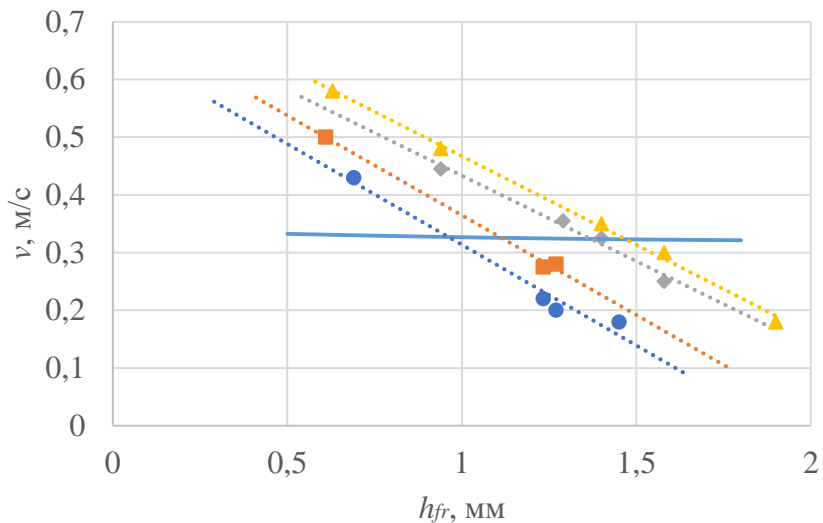
Модельные испытания л/к пр. 21900



Модельные испытания л/к пр. 21900

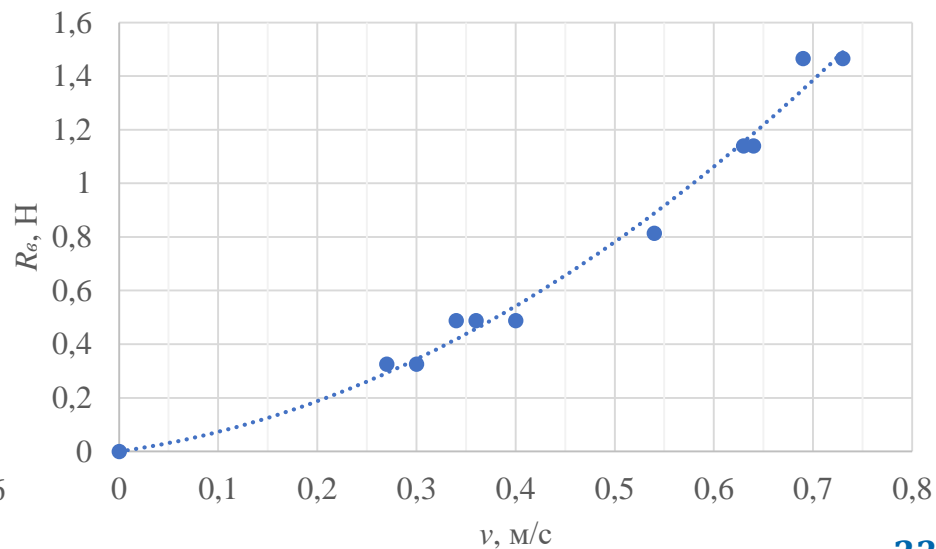
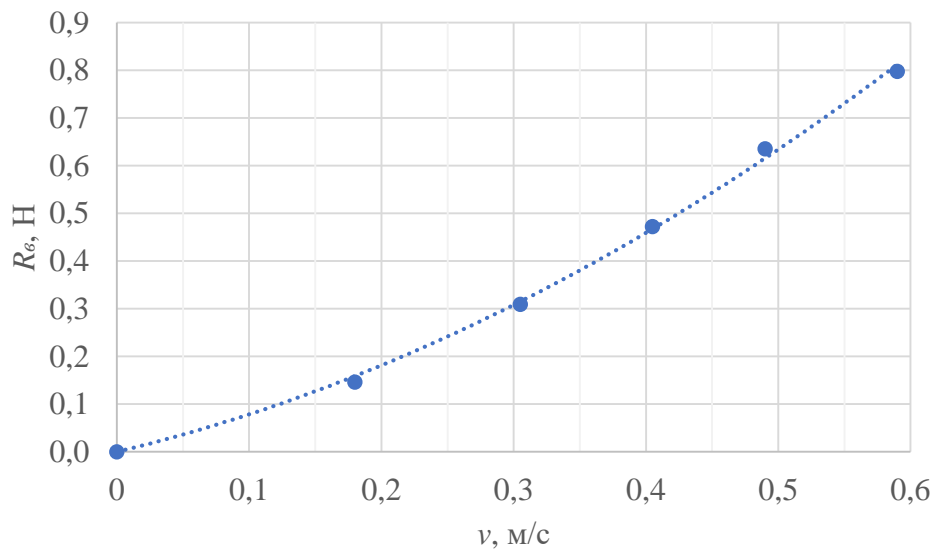
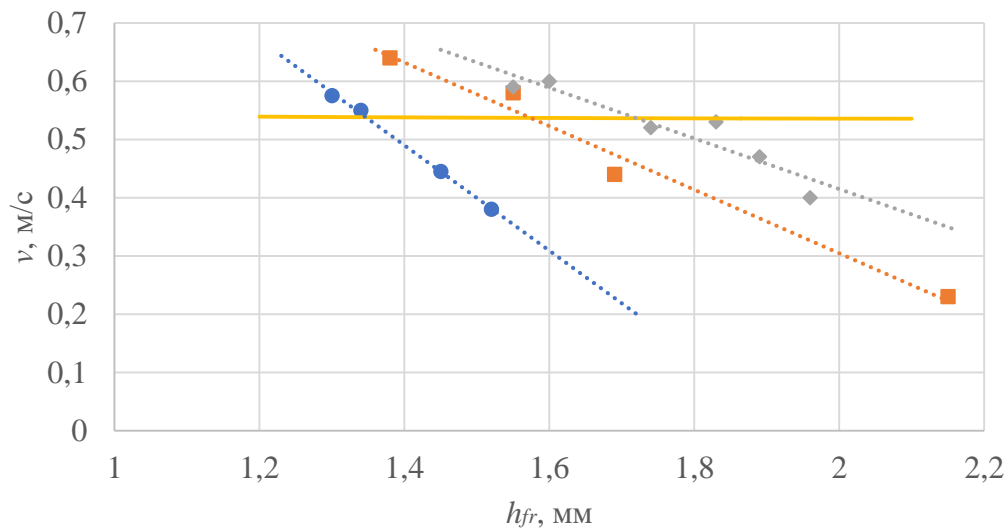
М 1:100

● 2,182 Н ■ 2,345 Н ◆ 2,508 Н ▲ 2,671 Н — натура

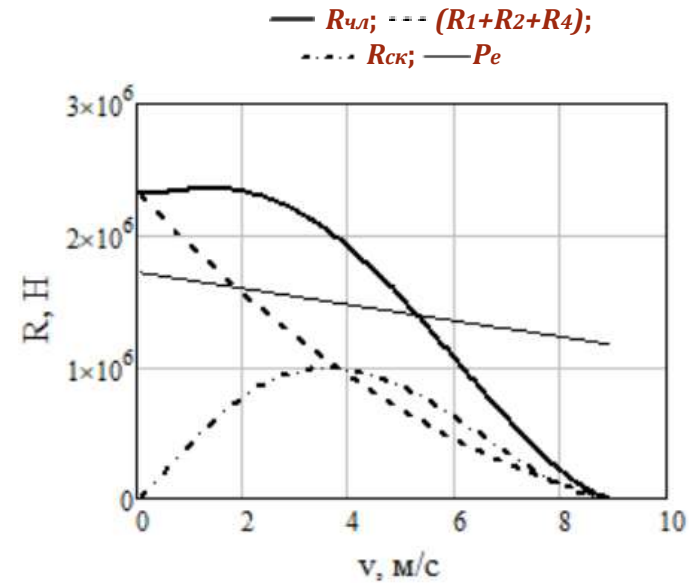
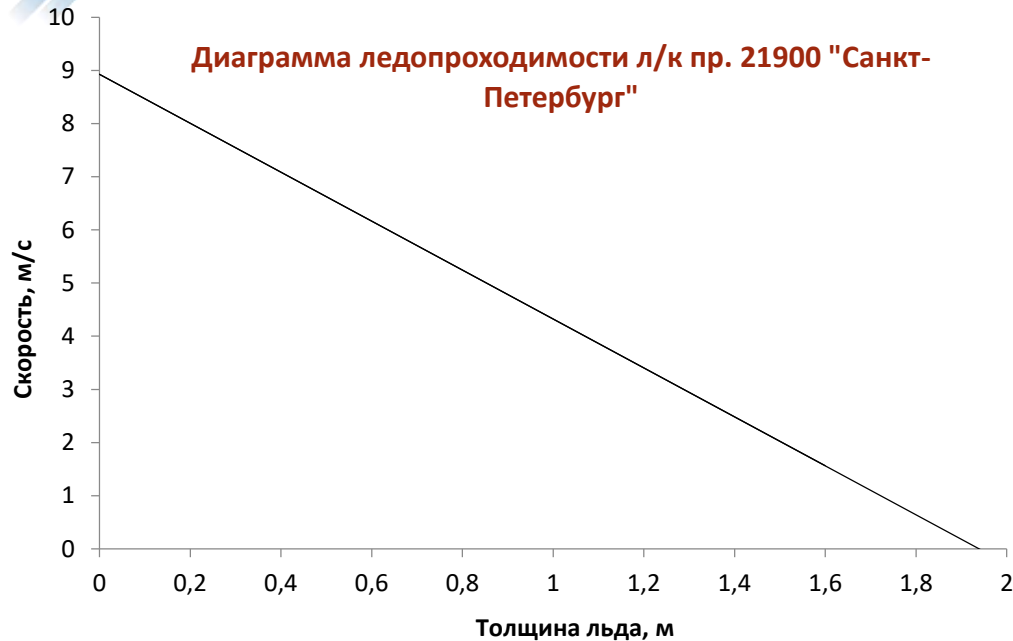


М 1:75

● 4,707 Н ■ 5,033 Н ◆ 5,358 Н — натура



Модельные испытания л/к пр. 21900



Установившийся режим движения морского ледокола

$$R_{чл} - P_e = 0$$

Чистое ледовое сопротивление

$$R_{чл} = R_1 + R_2 + R_4 + R_{ск}$$

Тяга винтов

$$P_e = P_{ш} - v k_e$$

$$R_1 = 0,011 \frac{\sigma_u h^2}{b} [\alpha_1(\beta) B + 2 f_d \alpha_2(\beta) L]$$

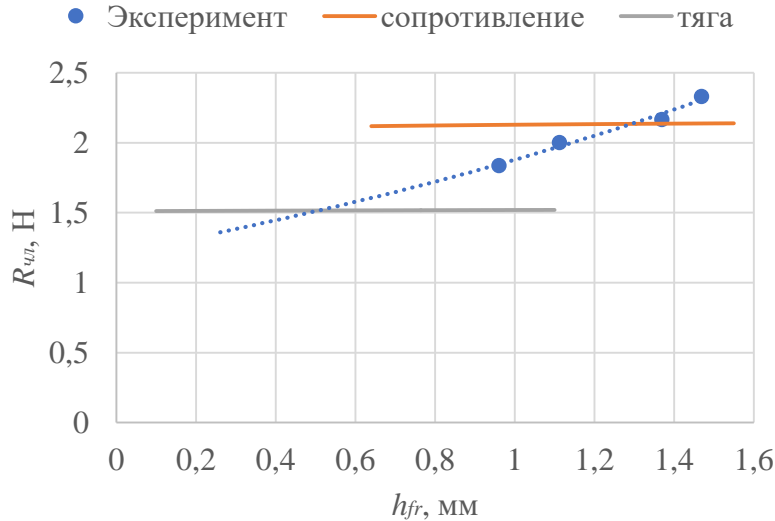
$$R_2 = 0,3 \rho_0 g h B L_n \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\operatorname{tg} \alpha_0 + \frac{B}{2L_n}} [\alpha_1(\beta) \sin \alpha_0 + f_d \alpha_2(\beta) (1 + \cos \alpha_0)]$$

$$R_4 = 1,2 \cdot \frac{B}{2T + B} f_d \rho_0 g h B L_{цв}$$

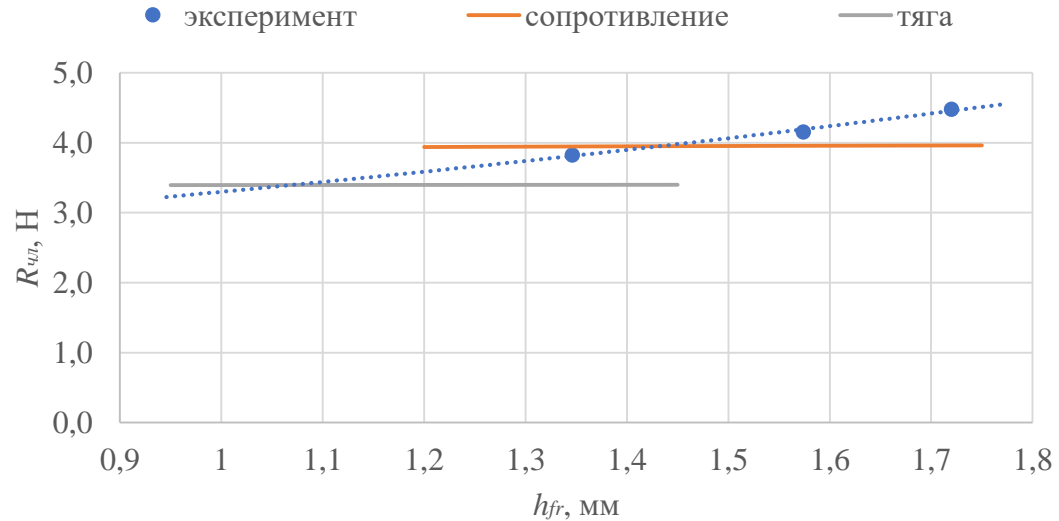
$$R_{ск} = h^{1,86} v^{1,26} k_v$$

Модельные испытания л/к пр. 21900

М 1:100



М 1:75



Установившийся режим движения морского ледокола

$$R_{ull} - P_e = 0$$

Чистое ледовое сопротивление

$$R_{ull} = R_1 + R_2 + R_4 + R_{ск}$$

Тяга винтов $P_e = P_{ин} - \nu k_e$

$$R_1 = 0,011 \frac{\sigma_u h^2}{b} [\alpha_1(\beta) B + 2 f_{дл} \alpha_2(\beta) L]$$

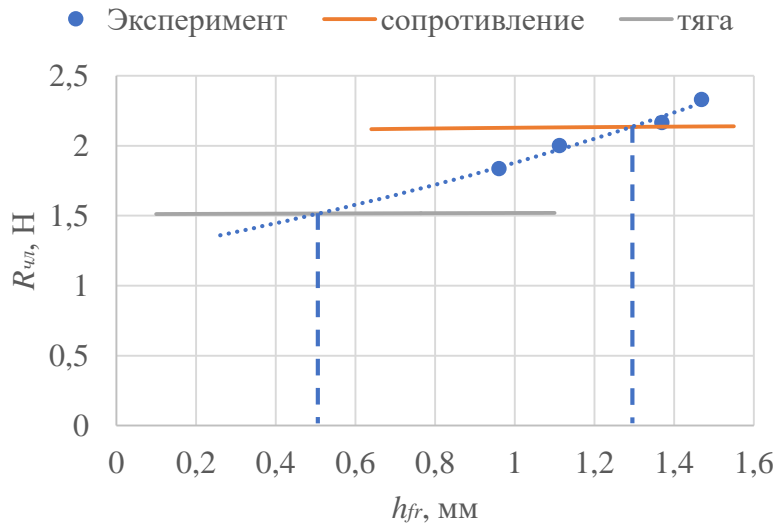
$$R_2 = 0,3 \rho_0 g h B L_n \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{\operatorname{tg} \alpha_0 + \frac{2L_n}{B}} [\alpha_1(\beta) \sin \alpha_0 + f_{дл} \alpha_2(\beta) (1 + \cos \alpha_0)]$$

$$R_4 = 1,2 \cdot \frac{B}{2T + B} f_{дл} \rho_0 g h B L_{цв}$$

$$R_{ск} = h^{1,86} \nu^{1,26} k_\nu$$

Модельные испытания л/к пр. 21900

М 1:100



М 1:75

