

УДК 625.768.5

И.С. Никандров, А.Л. Малыгин, И.И. Дунаев, А.А. Кукушкин, В.В. Парамонов

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИЛЫ РЕЗАНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДОВОЙ МАССЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Одним из факторов, сдерживающим создание эффективной техники по разрушению торосов при строительстве ледовых аэродромов для освоения Арктического шельфа является недостаток экспериментальных данных по резанию льда. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по резанию снежно-ледовой массы, имитирующей ледовые торосы единичным резцом. Предварительными опытами установлено, что наибольшее влияние на удельную силу резания снежно-ледовой массы оказывают:  $\alpha$ -угол резания, град;  $V_p$  – скорость резания, м/с;  $h$  – толщина снимаемой стружки, м. Эти факторы были выбраны в качестве исходных для разработки плана многофакторного эксперимента. В результате реализации центрального композиционного ортогонального плана было получено уравнение удельной силы резания снежно-ледовой массы.

Полученная зависимость является исходной и может быть использована при определении нагрузок, действующих на рабочие органы ледорезных машин при разрушении торосов.

*Ключевые слова:* снежно-ледовая масса, резание, сопротивление резанию.

### Введение

Освоение Арктического шельфа связано с необходимостью создания взлетно-посадочных полос, ледовых аэродромов, монтажа буровых платформ, прокладки инженерных коммуникаций. Одним из сдерживающих факторов реализации этого направления является наличие ледовых торосов, для разрушения которых требуется новая эффективная техника разработки льда. Большой опыт в ее создании накоплен в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, где были созданы десятки образцов ледорезных машин [1]. Однако, несмотря на успехи в опытно-конструкторской работе в целом, на стадии проектирования отсутствовал концептуальный подход. Во многом это объясняется недостатком экспериментальных данных по резанию льда, затрудняющим создание эффективной техники.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований по резанию снежно-ледовой массы единичным резцом. Полученные данные позволят более обоснованно подойти к определению нагрузок, действующих на рабочие органы машин, разрушающих ледовые торосы.

### Экспериментальная часть

Исследования проводились на стенде, созданном на базе горизонтально-фрезерного станка. Образцы смерзшейся снежно-ледовой массы, имитирующие торосы, готовились замораживанием смеси воды и снега в формах размером 300x200x100 мм. Для резания использовались стальные резцы шириной  $B = 16$  мм с углом резания  $\alpha = 15,7 \div 64,3$  град., углом скоса режущей кромки  $\beta = 12$  град. Скорость резания менялась в пределах  $V_p = 4 \div 16$  см/с, толщина снимаемой стружки лежала в пределах  $h = 10 \div 30$  мм.

Геометрические параметры резцов и режимы резания выбирались на основании рекомендаций [2]. Для замера силы резания использовался прецизионный пресс с усилием сжатия до 5000 Н. Погрешность измерения составляла  $\pm 0,1$  %.

На рис. 1 представлена зависимость удельной силы резания от содержания доли снега в смерзшейся смеси при температуре  $t = -20^\circ\text{C}$ .

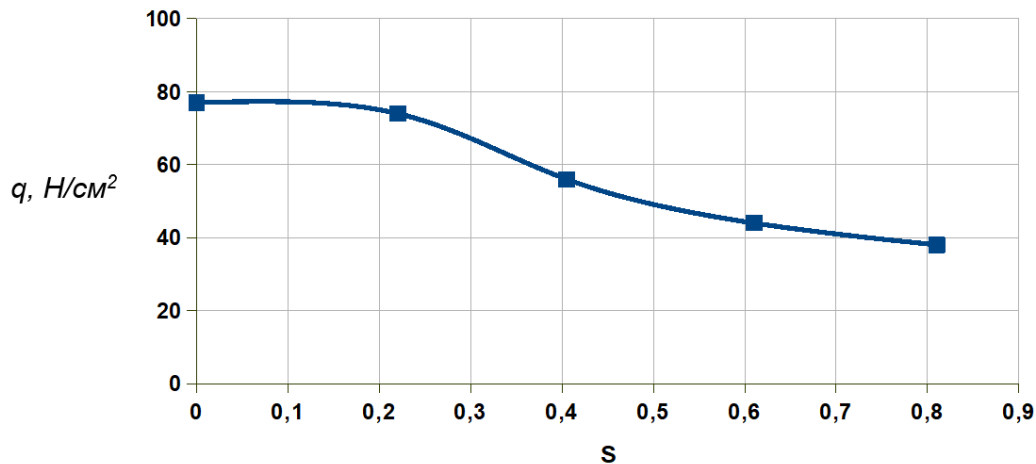


Рис. 1. Зависимость удельной силы резания ( $q, \text{Н/см}^2$ ) от доли снега ( $S$ ) в снежно-ледовой массе

Как видно из графика, с увеличением доли снега от 0 до 0,2 удельная сила снижается незначительно. При дальнейшем увеличении от 0,2 до 0,6 происходит более резкое снижение удельной силы резания, однако при дальнейшем увеличении  $S$  снижение удельной силы замедляется.

На рис. 2 представлена зависимость удельной силы резания от температуры льда (график 1) и снежно-ледовой массы (график 2).

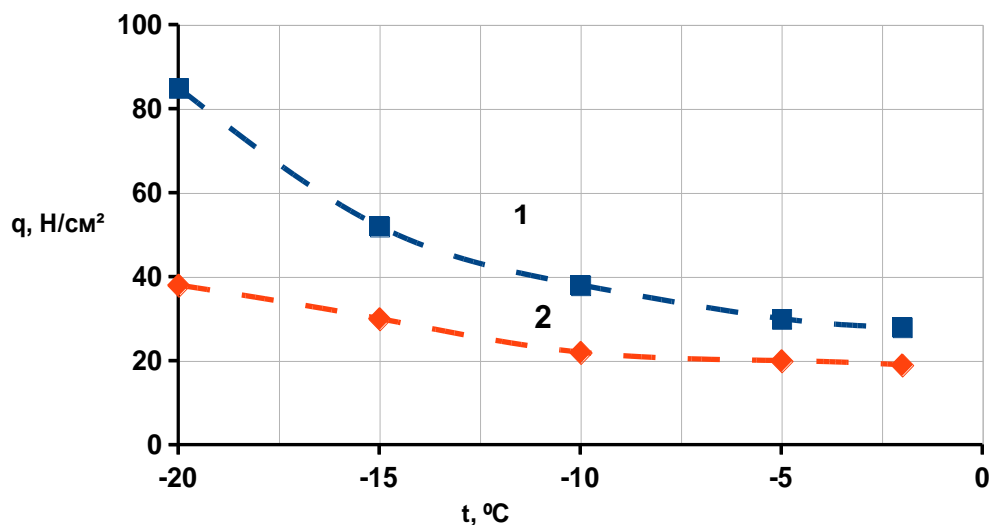
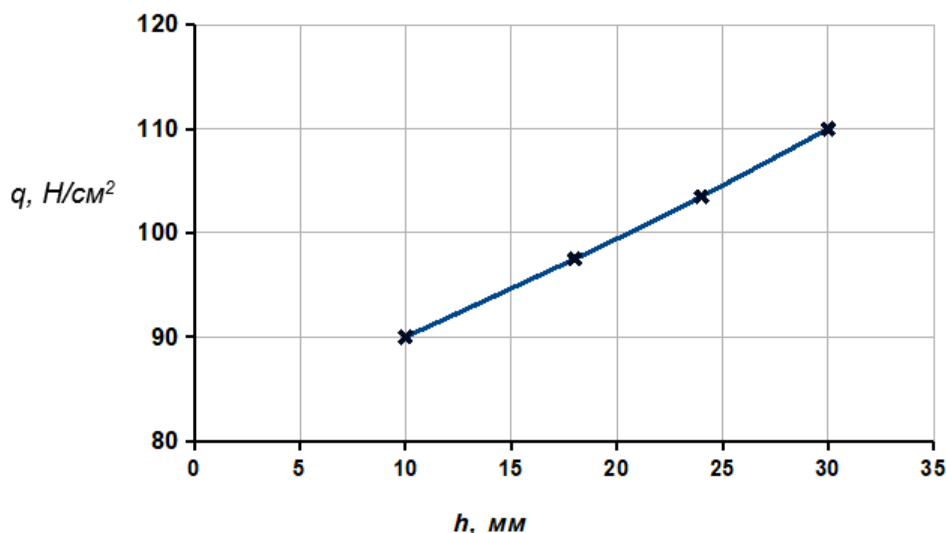


Рис. 2. Зависимость удельной силы резания ( $q, \text{Н/см}^2$ ) снежно-ледовой массы ( $S$ ) от температуры ( $t, ^\circ\text{C}$ )  
1 – лед, 2 – снежно-ледовая масса ( $S = 0,6$ )

На рис. 3 представлена зависимость удельной силы резания снежно-ледовой массы от толщины снимаемой стружки.



**Рис. 3. Зависимость удельной силы резания ( $q, \text{Н/см}^2$ ) снежно-ледовой массы ( $S$ ) от толщины снимаемой стружки ( $h, \text{мм}$ )**  
 ( $t = -15^\circ\text{C}$ ;  $V_p = 4 \text{ см/с}$ ;  $S = 0,6$ )

Предварительными экспериментами установлено, что наибольшее влияние на удельную силу резания оказывают:

- $\alpha$  – угол резания;
- $V_p$  – скорость резания;
- $h$  – толщина снимаемой стружки.

Эти аргументы были выбраны в качестве исходных факторов для разработки плана многофакторного эксперимента.

Для построения адекватной модели удельной силы резания экспериментально был реализован центральный композиционный ортогональный план, включающий 8 опытов полнофакторного эксперимента.

Величина угла скоса режущей кромки составляла  $\beta = 12$  град.; ширина реза  $B = 16$  мм; температура разрушаемого блока лежала в пределах  $t = -(19 \div 21)^\circ\text{C}$ ; доля снега в массе  $S = 0,6$ .

При этом сумма опытов равнялась (1):

$$N = N_{\text{п}} + 2n_{\text{ф}} + 1, \tag{1}$$

где  $N_{\text{п}}$  – число опытов полного факторного эксперимента (ПФЭ);  $n_{\text{ф}}$  – число действующих факторов ( $n_{\text{ф}} = 3$ );  $2n_{\text{ф}}$  – число опытов в звездных точках с координатами  $n_{\text{ф}} = 3$ .

$$\begin{pmatrix} \pm\alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где  $\alpha_3$  – звездное плечо, для  $n_{\text{ф}} = 3$  равно 1,215; опыт в центре плана при координатах (0-0-0).

В качестве переменных факторов нами приняты:

- $X_1$  – угол резания, град.;
- $X_2$  – глубина резания, м;
- $X_3$  – скорость резания, см/с.

Функцией отклика являлось удельное сопротивление резанию снежно-ледовой массы ( $q, \text{Н/см}^2$ ). Пределы варьирования переменных факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Варьирование переменных факторов

Условие фактора		$X_1$ , град.	$X_2$ , м	$X_3$ , см/с
Шаг варьирования		20	0,01	5
Нулевой уровень		40	0,02	10
Верхний уровень	+1	60	0,03	15
	+1,215	64,3	0,032	16
Нижний уровень	-1	20	0,01	5
	-1,215	15,7	0,008	4

## Результаты и их обсуждение

Матрица композиционного плана Хартли для  $n_{\phi} = 3$  (табл. 2).

Таблица 2

## Матрица композиционного плана Хартли

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1, X_2$	$X_1, X_3$	$X_2, X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	Значение функции отклика	
										$q_{min}$	$q_{max}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	51	56
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	87	94
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	41	44
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	96	111
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	46	50
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	114	120
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	55	61
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	37	43
9	-1,215	0	0	0	0	0	0,747	0,73	0,73	98	101
10	+1,215	0	0	0	0	0	0,747	0,73	0,73	162	167
11	0	-1,215	0	0	0	0	0,73	0,747	0,73	131	136
12	0	+1,215	0	0	0	0	0,73	0,747	0,73	140	144
13	0	0	-1,215	0	0	0	0,73	0,73	0,747	120	126
14	0	0	+1,215	0	0	0	0,73	0,73	0,747	93	96
15	0	0	0	0	0	0	0,73	0,73	0,73	95	99

После обработки результатов эксперимента получено следующее уравнение (3):

$$q = 93,8 + 14,3X_1 - 4,5X_2 - 1,1X_3 - 4,8X_1X_2 - 3,0X_1X_3 - 4,7X_2X_3 - 33,6X_1^2 + 14,3X_2^2 - 3,2X_3^2. \quad (3)$$

Проверка полученной модели на воспроизводимость с помощью критерия Кохрена по данным параллельных опытов показала положительный результат. После отсева малозначительных коэффициентов с помощью критерия Стьюдента [3] уравнение математической модели удельной силы резания снежно-ледовой массы единичным резцом приобрело следующий вид (4):

$$q = 93,8 + 14,3X_1 - 4,5X_2 - 4,8X_1X_2 - 4,7X_2X_3 - 33,6X_1^2 + 14,3X_2^2, \quad (4)$$

или после перевода кодированных переменных в физические величины (5):

$$q = 219,4 + 71,7\alpha + 510h - 29,5ah - 94hV_p - 0,084\alpha^2 + 463000h^2. \quad (3)$$

## Заключение

Полученная зависимость является исходной и может быть использована в разработке вычислительных алгоритмов и программ для определения нагрузочных характеристик рабочего органа. Это позволит обоснованно подойти к методике выбора рациональных конструктивных и режимных параметров ледорезных машин для разрушения торосов.

## Библиографический список

1. Николаев, А.Ф. Исследование и комплекс машин для разработки мерзлых грунтов, льда и снега / А.Ф. Николаев. – Горький, 1967, – 164 с.
2. Горшков, А.С. Резание смерзшейся грунто-ледяной массы клиновым резцом / А.С. Горшков, В.Ф. Кулепов, А.Д. Шурашов, И.С. Никандров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №6.
3. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Фиалковский. – Минск: изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982, – 302 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.04.2019*

I.S. Nikandrov, A.L. Malygin, I.I. Dunaev, A.A. Kukushkin, V.V. Paramonov

## THE CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CUTTING FORCE OF THE SNOW-ICE MASS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

**Purpose:** to determine the loads acting on the working bodies of ice-cutting machines in the destruction of hummocks.  
**Design/methodology / approach:** the study of physical models on the ground and the construction of a mathematical model based on the results of experimental studies.  
**Findings:** the Obtained dependence is the initial one and can be used to determine the loads acting on the working bodies of ice-cutting machines in the destruction of hummocks.  
**Research limitations/implications:** the results of experimental studies on cutting snow and ice mass with a single cutter will allow a more reasonable approach to determining the loads acting on the working bodies of machines that destroy ice hummocks.  
**Originality /value:** for the first time, the dependence of the specific cutting force on the content of the proportion of snow in the frozen mixture, on the ice temperature, on the thickness of the chip removed.

*Key words:* snow-ice mass, cutting, cutting resistance.