

УДК 629.5.072.1

ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯ БИТОГО ЛЬДА ДВИЖЕНИЮ ПЛОТА В УСЛОВИЯХ ПРОДЛЕННОЙ НАВИГАЦИИ

Злобин А.А., Корпачев В.П., Ушанов С.В.

ФГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет»,
Красноярск, e-mail: aazlobin@yandex.ru

В работе приведены зависимости полного ледового сопротивления, сопротивления воды и чистого ледового сопротивления движению сегмента плота от толщины битого льда, скорости буксировки, длины плота, отношения ширины канна к ширине плота. Эксперимент по определению сопротивления движению плота в условиях продленной навигации проводился с использованием натурального льда и сегмента плота из натурной древесины с линейными размерами $L \times B \times T$ ($2,4 \times 0,6 \times 0,1$ м), где L – длина сегмента плота, B – ширина сегмента плота, T – осадка сегмента плота. Приведена методика обработки и оптимизации экспериментальных данных, которые позволили получить уравнения регрессии полного ледового сопротивления, сопротивления воды и чистого ледового сопротивления движению сегмента плота. Стандартные ошибки моделей полного ледового сопротивления, сопротивления воды, чистого ледового сопротивления соответственно равны 0,084; 0,012; 0,061, а коэффициенты детерминации – 0,997; 0,980; 0,999.

Ключевые слова: продленная навигация, лесосплав, уравнение регрессии, битый лед, сопротивление, дисперсия

PROCESSING OF EXPERIMENTAL DATA RESISTANCE BROKEN ICE MOVEMENT RAFT IN THE WORKS FLOATING TIMBER EXTENSION OF NAVIGATION

Zlobin A.A., Korpachev V.P., Ushanov S.V.

Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, e-mail: aazlobin@yandex.ru

In this work the dependence of the total ice resistance, water resistance and resistance to movement of pure ice raft segment of the thickness of broken ice, towing speed, length raft ratio of the width to the width of the raft eland. Experiment to determine the resistance to movement of the raft in the extended navigation was performed using full-scale segment of the ice and a raft of full-scale timber with linear dimensions $L \times B \times T$ ($2,4 \times 0,6 \times 0,1$ m), where L – length segment of the raft, B – width of the segment raft, T – draught segment raft. The methods of processing and optimization of the experimental data, which gave a complete regression of the ice resistance, water resistance and resistance to movement of pure ice raft segment. Standard errors of models full of ice resistance, water resistance, resistance of pure ice, are respectively 0,084; 0,012; 0,061, and the coefficients of determination – 0,997; 0,980; 0,999.

Keywords: prolonged navigation, rafting, regression equation, broken ice, resistance, variance

Современный уровень развития ледокольной техники позволяет организовать транспортировку лесоматериалов по рекам и водохранилищам в продленный период навигации. Продление навигации может быть обеспечено прокладкой каналов в ледовом поле в ранне-весенний и осенний периоды навигации [2; 4].

В связи с этим возникает необходимость аналитического и экспериментального исследования закономерностей движения плота в ледовом канале.

Цель исследования – получить математические модели полного ледового сопротивления, сопротивления воды, чистого ледового сопротивления движению плота в зависимости от длины плота, толщины льда, скорости буксировки, отношения ширины канала к ширине плота.

Для получения опытных данных был проведен полнофакторный трехуровневый эксперимент по определению чистого ледового сопротивления движению плота. В силу ограниченности условий проведе-

ния опытов была взята модель сегмента плота масштабом 1:15 с линейными размерами $L \times B \times T$ ($2,4 \times 0,6 \times 0,1$ м), где L – длина сегмента плота, B – ширина сегмента плота, T – осадка сегмента плота. Гидродинамические условия смоделированы с учетом критерия подобия Фруда [1]. Опыты проводились с натурным льдом в полевых условиях на озере острова Татышева ($56^{\circ}01'43''N$ $92^{\circ}56'47''E$). В качестве входных регулируемых параметров были приняты (табл. 1):

- Длина сегмента плота ($L_{пл}$) –

$$x_1 = \frac{L_{пл} - 1,6}{0,8}.$$

- Толщина битого льда в канале ($h_{л}$) –

$$x_2 = \frac{h_{л} - 0,012}{0,05}.$$

- Скорость буксировки сегмента плота в ледовом поле ($v_{пл}$) –

$$x_3 = \frac{v_{пл} - 0,2}{0,1}.$$

• Отношение ширины канала к ширине сегмента плота (K_B) –

$$x_4 = \frac{K_B - 1,6}{0,4}.$$

Таблица 1

Входные регулируемые параметры эксперимента по определению сопротивления битого льда движению плота

Уровень	Значения факторов				
	X_i	$L_{пл}, м$	$h_{л}, м$	$v_{пл}, м/с$	K_B
1	-1	0,8	0,007	0,1	1,2
2	0	1,6	0,012	0,2	1,6
3	+1	2,4	0,017	0,3	2

Функциями отклика связывающие входные параметры, характеризующие результаты эксперимента, с варьируемыми переменными, являются:

- Полное ледовое сопротивление (δ_n), Н.
- Сопротивление воды (δ_b), Н.
- Чистое ледовое сопротивление ($\delta_{чл}$), Н; $\delta_{чл} = \delta_n - \delta_b$.

При числе параллельных опытов $m = 5$ и числе уровней каждого фактора, равного трем, получено 405 опытных значений в каждой функции отклика.

Обработка экспериментальных данных проведена в математическом пакете Mathcad.

$$Kf_0 \leftarrow 1$$

$$Kf_1 \leftarrow x_1$$

$$Kf_2 \leftarrow x_1^2$$

$$Kf_3 \leftarrow x_2$$

$$Kf_4 \leftarrow x_1 \cdot x_2$$

$$Kf_5 \leftarrow x_1^2 \cdot x_2$$

$$Kf_6 \leftarrow x_2^2$$

$$Kf_7 \leftarrow x_1 \cdot x_2^2$$

$$Kf_8 \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2$$

$$Kf_9 \leftarrow x_3$$

$$Kf_{10} \leftarrow x_1 \cdot x_3$$

$$Kf_{11} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3$$

$$Kf_{12} \leftarrow x_2 \cdot x_3$$

$$Kf_{13} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Kf_{14} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Kf_{15} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3$$

$$Kf_{16} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3$$

$$Kf_{17} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3$$

$$Kf_{18} \leftarrow x_3^2$$

$$Kf_{19} \leftarrow x_1 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{20} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{21} \leftarrow x_2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{22} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{23} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{24} \leftarrow x_2^2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{25} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{26} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2$$

$$Kf_{27} \leftarrow x_4$$

$$Kf_{28} \leftarrow x_1 \cdot x_4$$

$$Kf_{29} \leftarrow x_1^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{30} \leftarrow x_2 \cdot x_4$$

$$Kf_{31} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_4$$

$$Kf_{32} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_4$$

$$Kf_{33} \leftarrow x_2^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{34} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{35} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{36} \leftarrow x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{37} \leftarrow x_1 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{38} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{39} \leftarrow x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{40} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{41} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{42} \leftarrow x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{43} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{44} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4$$

$$Kf_{45} \leftarrow x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{46} \leftarrow x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{47} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{48} \leftarrow x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{49} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{50} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{51} \leftarrow x_2^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{52} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{53} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4$$

$$Kf_{54} \leftarrow x_4^2$$

$$Kf_{55} \leftarrow x_1 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{56} \leftarrow x_1^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{57} \leftarrow x_2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{58} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{59} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{60} \leftarrow x_2^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{61} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{62} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{63} \leftarrow x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{64} \leftarrow x_1 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{65} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{66} \leftarrow x_2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{67} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{68} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{69} \leftarrow x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{70} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{71} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{72} \leftarrow x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{73} \leftarrow x_1 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{74} \leftarrow x_1^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{75} \leftarrow x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{76} \leftarrow x_1 \cdot x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{77} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{78} \leftarrow x_2^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{79} \leftarrow x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

$$Kf_{80} \leftarrow x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3^2 \cdot x_4^2$$

Дисперсия воспроизводимости S_v^2 и ошибки опытов (воспроизводимости) S_v , расчетные значения критерия Кохрена Gr для полного ледового сопротивления δ_n , сопротивления воды δ_b и чистого ледового сопротивления $\delta_{чл}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения дисперсий воспроизводимости S_v^2 , ошибок опытов S_v и расчетных значений критерия Кохрена Gr для δ_n , δ_b , $\delta_{чл}$

	δ_n	δ_b	$\delta_{чл}$
S_v^2	0,0005	0,0003	0,0008
S_v , Н	0,0233	0,016	0,028
Gr	0,038	0,034	0,039

Гипотеза однородности дисперсий не отклоняется при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($Gr < G_{таб} = 0,059$, где $G_{таб}$ – критическое значение критерия Кохрена).

Математическая модель полнофакторного эксперимента, описывающая зависимость ледового сопротивления от рассматриваемых входных величин, содержит 81 коэффициент регрессии. Матрица функций от входных параметров при коэффициентах модели имеет вид:

Для оптимизации и сжатия математической модели (уменьшения размерности ее коэффициентов) принято условие 5%-й ошибки от среднего значения выходных значений, что допустимо при проведении технологических расчетов лесосплавных работ.

По составленной программе в системе MathCad для каждой из моделей вычислены их коэффициенты матричным методом наименьших квадратов, расчетные значения δ , стандартные ошибки коэффициентов, рас-

четные значения критерия Стьюдента оценки значимости отличия коэффициентов от нуля, дисперсии адекватности, стандартные ошибки и коэффициенты детерминации моделей, проведена оценка адекватности модели по критерию Фишера и выполнена процедура сжатия модели [3, 5].

После выполнения процедуры сжатия в математических моделях $\delta_{пг}$, $\delta_{вг}$, $\delta_{чл}$ осталось соответственно 12; 7 и 15 коэффициентов регрессии:

$$\begin{aligned} \delta_{пг} = & 0,874 + 0,074 \cdot x_1 + 1,666 \cdot x_2 + 0,216(x_1 \cdot x_2) + 1,465 \cdot x_2^2 + \\ & + 0,199(x_1 \cdot x_2^2) + 0,091(x_1^2 \cdot x_2^2) + 0,102 \cdot x_3 + 0,179(x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3) + \\ & + 0,141(x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3) - 0,199 \cdot x_4^2 - 0,102(x_2 \cdot x_4^2); \end{aligned}$$

$$\delta_{вг} = 0,503 + 0,059 \cdot x_1 + 0,013 \cdot x_1^2 + 0,07 \cdot x_3 + 0,014 \cdot x_3^2 - 0,032 \cdot x_4 - 0,011(x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4);$$

$$\begin{aligned} \delta_{чл} = & 0,357 + 1,607 \cdot x_2 + 0,216(x_1 \cdot x_2) + 0,089(x_1^2 \cdot x_2) + 1,47 \cdot x_2^2 + \\ & + 0,214(x_1 \cdot x_2^2) + 0,079(x_1^2 \cdot x_2^2) + 0,045(x_1 \cdot x_2 \cdot x_3) + 0,18(x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3) + \\ & + 0,048(x_1 \cdot x_2^2 \cdot x_3) + 0,143(x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3) - 0,029(x_1 \cdot x_4) - 0,203 \cdot x_4^2 - \\ & - 0,105(x_2 \cdot x_4^2) + 0,041(x_2^2 \cdot x_3 \cdot x_4^2). \end{aligned}$$

Результаты сопоставления расчетных и фактических значений $\delta_{пг}$, $\delta_{вг}$, $\delta_{чл}$ представлены на рис. 1–3.

Стандартные ошибки (S), коэффициенты детерминации (R^2) и число степеней свободы (f) полученных моделей представлены в табл. 3.

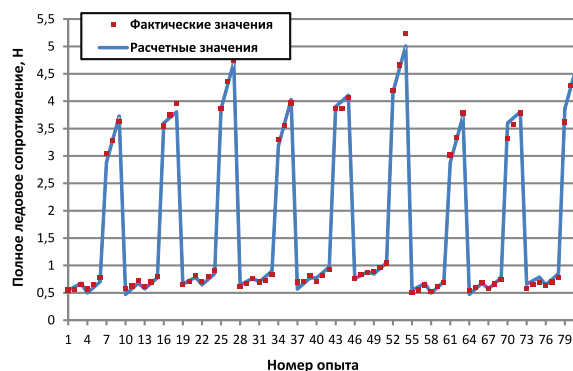


Рис. 1. Расчетные и фактические значения ледового сопротивления движению сегмента плота

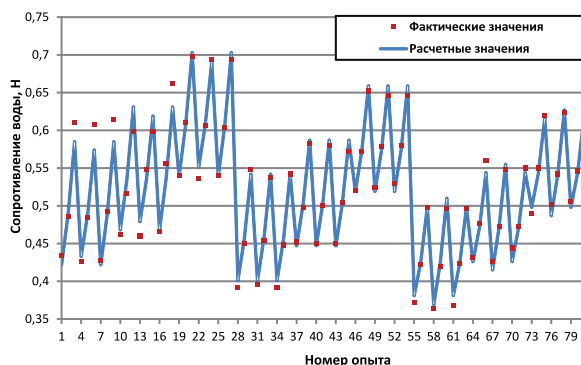


Рис. 2. Расчетные и фактические значения сопротивления воды движению сегмента плота

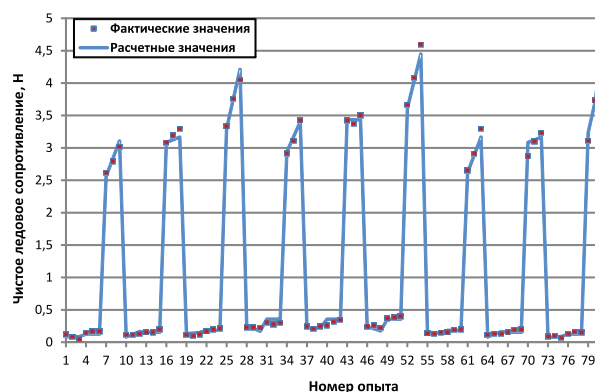


Рис. 3. Расчетные и фактические значения чистого ледового сопротивления движению сегмента плота

Таблица 3
Характеристики точности моделей δ_{π} , δ_{ν} , $\delta_{\text{чл}}$

	δ_{π}	δ_{ν}	$\delta_{\text{чл}}$
S	0,084	0,012	0,061
R^2	0,997	0,99995	0,999
f	69	74	66

Выводы

Получены адекватные эксперименту модели полного ледового сопротивления, сопротивления воды, чистого ледового сопротивления движению плота, учитывающие скорость буксировки, длину плота, толщину льда в канале, отношение ширины канала к ширине плота. Полученные результаты необходимы для определения оптимальных условий организации лесосплавных работ в период продленной навигации и соответствующих технико-экономических показателей.

Список литературы

1. Злобин А.А., Максимова Е.М. Проведение эксперимента в полевых условиях по определению сопротивления битого льда движению плота // Новые идеи нового века: материалы Международной научной конференции. – Хабаровск, 2013. – Т. 2. – С. 288–293
2. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях: монография. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
3. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

4. Корпачев В.П. Теоретические основы водного транспорта леса: монография. – М.: Академия Естествознания, 2009. – 237 с.

5. Ушанов С.В. Параметрическая и идентификация моделей. – Красноярск: Антера-принт, 2012. – 212 с.

References

1. Zlobin A.A., Maksimov E.M. International scientific conference «New ideas of the new century – Experiments in the field to determine the resistance to the movement of broken ice raft – Khabarovsk, 2013, Vol. 2, pp. 288–293.
2. Zuev V.A. Means extension of navigation on inland waterways: monograph. Leningrad, Shipbuilding., 1986. 208 p.
3. Kobzar A.I. Applied Mathematical Statistics. For engineers and scientists. Moscow, FIZMATLIT., 2006. 816 p.
4. Korpachev V.P. Theoretical Foundations of water transport timber: monograph. Moscow: Academy of Natural Sciences, 2009. 237 p.
5. Ushanov S.V., Parametric modeling and identification. Krasnoyarsk, Antera-print, 2012. 212 p.

Рецензенты:

Полетайкин В.Ф., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии и машин природообустройства, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск;

Лозовой В.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования лесозаготовок, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 18.09.2013.