

УДК 630*387.33

В.М. Федулов, В.А. Барабанов

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

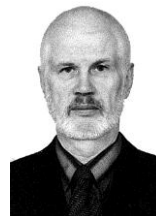
Федулов Василий Михайлович родился в 1988 г., окончил в 2009 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет 4 печатные работы в области совершенствования водного транспорта леса.

E-mail: foontvasily@gmail.com



Барабанов Виктор Александрович родился в 1945 г., окончил в 1967 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет более 90 печатных работ в области совершенствования водного транспорта леса и взаимодействия тел с жидкостью.

Тел.: 8(8182) 21-61-50



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТОВ ИЗ ПЛОСКИХ СПЛОТОЧНЫХ ЕДИНИЦ

Приведены результаты исследований гидродинамических характеристик плотов из плоских сплотовых единиц, получены математические зависимости для определения коэффициентов сопротивления и результирующей силы полного сопротивления.

Ключевые слова: сила сопротивления, плот, плоские сплотовые единицы, коэффициент сопротивления формы, коэффициент сопротивления трения, мелководье.

На малых реках с ограниченными глубинами и шириной, где затруднен или невозможен сплав плотов, состоящих из стандартных пучков, возможно применение плотов из плоских сплотовых единиц (ПСЕ) малой осадки. Для их надежной эксплуатации требуется знать гидродинамические и инерционные характеристики плотов и разработать рациональное техническое обеспечение.

Профессору А.А. Митрофанову принадлежит приоритет научных исследований, направленных на разработку и обоснование новых технологий лесосплава на базе ПСЕ малой осадки [2]. К настоящему времени опубликованы некоторые результаты исследований одиночных ПСЕ [3] и линеек из них [6, 9].

Целью нашей работы является экспериментальная оценка силы сопротивления воды равномерному движению плотов, состоящих из двух сплотовых единиц по ширине (рис. 1), а также определение коэффициентов сопротивления трения и формы с использованием моделей в условиях спокойной воды при различных интервалах между сплотовыми единицами по длине и ширине.



Рис. 1. Модель плота из двенадцати пятирядных ПСЕ

Экспериментальные исследования были выполнены в опытном бассейне гравитационного типа лаборатории кафедры водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) федерального университета. Ширина бассейна 3 м, длина 14 м, глубина 0,3 м. Исследования проводились на моделях в геометрическом масштабе 1 : 20. Соотношение глубины бассейна к осадке плота $\frac{h_6}{T}$ изменялось от 6,5 до 32,0. При этом T варьировалась в пределах 0,007...0,044 м, h_6 – в пределах 0,07...0,30 м. Длину моделей изменяли в диапазоне 0,65...2,00 м, интервалы между сплоточными единицами по длине C_1 и ширине C_2 – в диапазоне 0,00...0,05 м.

Волновое сопротивление (сопротивление от волн, вызванных движением плота на поверхности жидкости) зависит от глубины наполнения бассейна в том случае, если скорость движения модели превышает $0,4\sqrt{gh_6}$ [1]. Таким образом, если $0,4\sqrt{9,81 \cdot 0,3} = 0,69$ м/с, то глубина наполнения бассейна не оказывает влияния на волновое сопротивление. В наших экспериментах максимальные скорости движения моделей в экспериментах не превышали 0,24 м/с, т. е. глубина наполнения бассейна не оказывала влияния на волновое сопротивление.

Для создания тяговых усилий использовали канатоблочную систему, аналогичную описанной в работе [6], но с применением нового оборудования. Движение моделей плотов фиксировали с помощью бесконтактного датчика оборотов ВС-401. Электрический сигнал, поступающий от датчика, через дифференциальный усилитель ZET-410 и аналого-цифровой преобразователь ZET-220 передавался в персональный компьютер (ПК) для дальнейшей обработки.

Запись и первоначальную обработку сигналов осуществляли с использованием программного пакета ZetLab, который поставлялся вместе с выше-названным измерительным оборудованием. По результатам буксировки моделей строили графики зависимости скорости от времени.

Модели изготавливали из модельных бревен диаметром 10...11 мм и длиной (325±2) мм. Моделирование выполнялось в диапазоне чисел Фруда (0,017...0,095). Числа Рейнольдса варьировались в диапазоне (0,5...3,6)·10⁵. В качестве линейного параметра при определении чисел Фруда и Рейнольдса была принята длина модели *L*. Опыты проводили при температуре воды 15...16 °С. Буксировали модели при пяти различных скоростях *v*, соответствующих натурным, в диапазоне от 0,35 до 1,00 м/с. На основании рекомендаций [2] число повторений в серии опытов было принято равным пяти.

Определение полного сопротивления

Для получения математической зависимости определения полного сопротивления воды движению плота из ПСЕ был использован метод множественной регрессии. В качестве входных величин были выбраны длина *L*, осадка *T*, интервал по ширине *C*₁ и длине *C*₂, квадрат скорости движения модели *v*². Ширину *B* изменяли за счет изменения интервала *C*₁. Входные факторы варьировались на различных уровнях: осадка и длина – на трех уровнях, интервалы – на двух, скорость – на пяти.

Все расчеты были выполнены на ПК с помощью программного пакета Statistica. Применялся метод пошагового включения переменных [10]. Коэффициенты регрессии *b*_{*i*} приведены в табл. 1. Незначимые коэффициенты, для которых расчетное значение *t*-критерия меньше табличного, в таблицу не включены.

В результате было получено следующее уравнение регрессии:

$$\hat{R} = 0,06 + 202,16Tv^2 + 2,26Lv^2 + 50,76TLv^2 + 12,56C_2Lv^2 + 442,93TC_1v^2 + 564,59 C_1C_2L - 13559,27TC_1C_2Lv^2. \quad (1)$$

Таблица 1

Статистические характеристики

Параметр	Коэффициент регрессии <i>b</i> _{<i>i</i>}	Стандартное отклонение <i>s</i> _{<i>b</i>_{<i>i</i>}}	t-критерий		± 95 %-й доверительный интервал
			расчетный	табличный	
<i>b</i> ₀	0,06	0,0027	20,568	1,653	0,0511...0,0619
<i>b</i> ₁₅	202,16	4,4133	45,807		193,4500...210,8700
<i>b</i> ₄₅	2,26	0,1069	21,110		2,0471...2,4693
<i>b</i> ₁₄₅	50,76	3,9252	12,932		43,0144...58,5039
<i>b</i> ₃₄₅	12,56	2,1072	5,962		8,4062...16,7215
<i>b</i> ₁₂₅	442,93	83,5326	5,302		278,1100...607,7430
<i>b</i> ₁₂₃₄	564,59	98,8875	5,709		369,4740...759,7000
<i>b</i> ₁₂₃₄₅	-13559,27	2765,2300	-4,903		-19015,3000...-8103,2000

Далее определяли значимость регрессии. Для этого вычисляли F-критерий. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты дисперсионного анализа

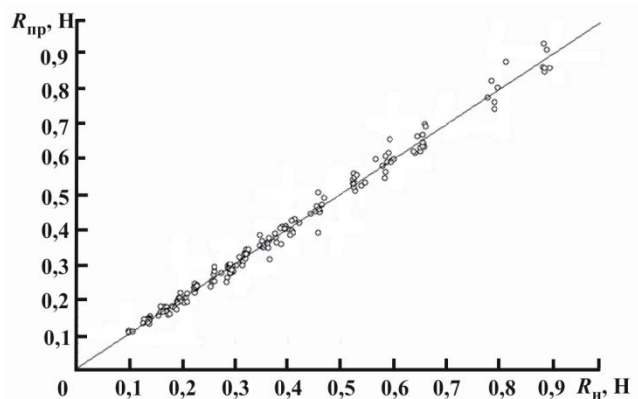
Параметр	Сумма квадратов SS	Число степеней свободы df	Средний квадрат MS	F-критерий
b_0	0,142048	1	0,142048	423,03
b_{15}	0,704572	1	0,704572	2098,28
b_{45}	0,149635	1	0,149635	445,63
b_{145}	0,056152	1	0,056152	167,23
b_{345}	0,011937	1	0,011937	35,55
b_{125}	0,009441	1	0,009441	28,12
b_{1234}	0,010946	1	0,010946	32,60
b_{12345}	0,008074	1	0,008074	24,04
Остаток	0,061113	182	0,000336	–

При числе степеней свободы 1, 182 и доверительной вероятности 95 % табличное значение $F_{табл} = 3,89$. Так как для всех значений $F_{расч} > F_{табл}$, была принята гипотеза о том, что регрессия значима с риском ошибиться не более чем в 5 % случаев.

Далее вычисляли коэффициент множественной корреляции R^2 и скорректированный коэффициент множественной корреляции R_{adj}^2 [10, 11]: $R^2 = 0,992$; $R_{adj}^2 = 0,991$, т.е. полученное уравнение регрессии (1) на 99,1 % объясняет разброс данных относительно среднего \bar{R} .

График, приведенный на рис. 2, иллюстрирует связь между наблюдаемыми и предсказанными по уравнению регрессии (1) значениями сопротивления. Экспериментальные точки располагаются в достаточной близости от биссектрисы координатного угла без значительного отклонения. Можно сделать вывод, что математическая модель (1) адекватно отражает экспериментальные данные.

Рис. 2. График связи между предсказанными $R_{пр}$ и наблюдаемыми $R_{н}$ значениями сопротивления



Определение коэффициентов сопротивления трения и формы

Зависимость для определения сопротивления движению моделей на глубокой спокойной воде в классическом варианте имеет следующий вид [5]:

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{волн}} = \left(\xi_{\text{тр}} S + C_{\text{ф}} \Omega + C_{\text{волн}} W \right) \frac{\rho v^2}{2},$$

где $R_{\text{тр}}$ – сопротивление трения;
 $R_{\text{ф}}$ – сопротивление формы;
 $R_{\text{волн}}$ – волновое сопротивление;
 $\xi_{\text{тр}}$ – коэффициент сопротивления трения;
 L, B, T – соответственно длина, ширина и осадка модели;
 S – площадь трения, $S = (2T + B)L$;
 $C_{\text{ф}}$ – коэффициент сопротивления формы;
 Ω – площадь миделевого сечения, $\Omega = BT$;
 $C_{\text{волн}}$ – коэффициент волнового сопротивления;
 W – характерная площадь;
 ρ – плотность воды;
 v – скорость движения модели.

Волновой составляющей сопротивления $R_{\text{волн}}$ можно пренебречь, так как скорости движения, а соответственно, и числа Фруда малы. Волнообразование практически не происходит. Поэтому

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ф}}.$$

Для каждой модели плота коэффициент $\xi_{\text{тр}}$ определяли по формуле [8]:

$$\xi_{\text{тр}} = \left(1,89 + 1,621g \left(\frac{L}{k_s} \right) \right)^{-2,5},$$

где k_s – крупность зерна эквивалентной «песочной» шероховатости плотов ($k_s = 5$ мм – для натуральных плотов, $k_s = 0,5$ мм – для моделей плотов в геометрическом масштабе 10 – 50 [7]).

Коэффициент $C_{\text{ф}}$ рассчитывали как

$$C_{\text{ф}} = \frac{2(R - R_{\text{тр}})}{\rho \Omega v^2}. \quad (2)$$

Полное сопротивление R определяли по результатам экспериментальных исследований для каждого опыта в зависимости от скорости равномерно-го движения модели, длины, осадки, интервалов по длине и ширине между сплочными единицами. В результате расчета коэффициентов $C_{\text{ф}}$ по формуле (2) для каждой модели плота из ПСЕ методом наименьших квадратов была подобрана аппроксимирующая зависимость вида

$$C_{\text{ф}} = 0,733 + 0,744 \left(\frac{B}{T} \right)^{-0,74}. \quad (3)$$

Формула (2) применима для диапазона натуральных скоростей от 0,35 до 1,00 м/с и диапазона отношения $\frac{B}{T} = 14 \dots 100$.

Влияние мелководья на сопротивление движению плотов из ПСЕ

Максимальная глубина наполнения бассейна, при которой его дно не оказывает дополнительного влияния на сопротивление движению, определяли по рекомендациям [4, 5]. Считается, что глубина воды в бассейне h_6 не оказывает влияние на вязкостное сопротивление движению пучковых плотов при отношении глубины к осадке $\frac{h_6}{T} > 8$ [4] или $\frac{h_6}{T} > 10$ [7].

Дополнительное сопротивление, учитывающее влияния мелководья, можно выразить зависимостью

$$\Delta R = kR,$$

где k – коэффициент дополнительного сопротивления от влияния мелководья.

В результате исследований были получены коэффициенты $k = f\left(\frac{h_6}{T}\right)$, характеризующие влияние мелководья на сопротивление движению (табл. 3).

Таблица 3

Коэффициенты k для плотов из ПСЕ

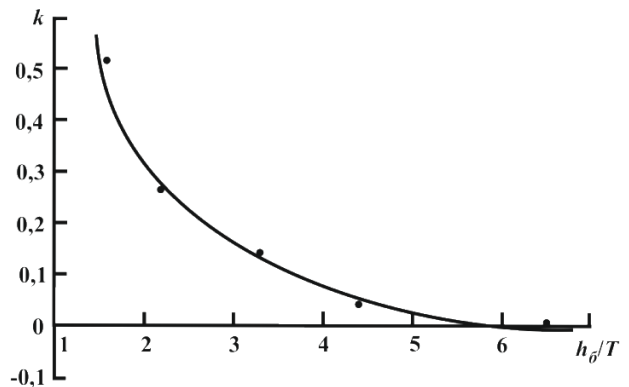
h_6/T	6,5	4,4	3,3	2,2	1,6
k	0,005	0,043	0,141	0,264	0,516

Из табл. 3 видно, что при $\frac{h_6}{T} = 6,5$ дополнительное влияние мелководья составляет лишь 0,5 % от сопротивления на глубокой воде, в то время как при $\frac{h_6}{T} = 1,6$ возникает дополнительное сопротивление 51,6 %.

По результатам расчетов был построен график зависимости $k = f\left(\frac{h_6}{T}\right)$, приведенный на рис. 3.

Рис. 3. График зависимости

$$k = f\left(\frac{h_6}{T}\right)$$



Выводы

По результатам экспериментальных исследований получены:

математическая модель для определения полного сопротивления, которая учитывает гидродинамические эффекты, возникающие от наличия промежутков между сплоточными единицами по длине и ширине, и адекватно описывает экспериментальные данные;

формула для определения сопротивления формы в виде $C_{\phi} = f\left(\frac{B}{T}\right)$, ко-

торая применима для малых плотов из ПСЕ в диапазоне $\frac{B}{T} = 14 \dots 100$;

коэффициенты дополнительного сопротивления от влияния мелководья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников Л.В. Исследование гидродинамического способа остановки плотов водными парашютами: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 1974. 228 с.
2. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: моногр. Архангельск: АГТУ, 2007. 492 с.
3. Мурашова О.В., Митрофанов А.А. Исследование гидродинамических характеристик плоских сплоточных единиц на моделях и в натуральных условиях // Лесн. журн. 2007. №1. С. 58–66. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Овчинников М.М. Транспортные характеристики пучковых плотов: учеб. пособие. Ленинград: ЛТА, 1985. 80 с.
5. Павленко Г.Е. Сопротивление воды движению судов. М.: Мор. транспорт, 1956. 508 с.
6. Перфильев П.Н., Митрофанов А.А. Исследования гидродинамических характеристик леек из плоских сплоточных единиц // Лесн. журн. 2009. №1. С. 44–51. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Худогов В.Н. Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды. Красноярск: Красн. кн. изд-во, 1966. 225 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
9. Штаборов Д.А. Некоторые результаты исследований инерционных характеристик леек из плоских сплоточных единиц // Совершенствование техники и технологии лесозаготовок и транспорта леса: сб. науч. тр. ФПР АГТУ. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2010. С. 96–98.
10. Rawlings J.O., Pantula S.G., Dickey D.A. Applied regression analysis: A research tool. New York: Springer-Verlag, 1998. 659 p.
11. Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

Поступила 20.11.10

V.M. Fedulov, V.A. Barabanov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Results of Experimental Studies of Hydrodynamic Characteristics of Flat-Unit Rafts

The article presents the results of experimental studies of hydrodynamic characteristics of flat-unit rafts. The results are introduced in the form of mathematical relations for calculation of resistance coefficients and resultant force of total resistance.

Key words: resistance force, raft, flat raft units, form resistance coefficient, friction resistance coefficient, shallow water.
