

УДК 630\*378

**О.В. Мурашова, А.А. Митрофанов**

Мурашова Ольга Валерьевна родилась в 1978 г., окончила в 2000 г. Архангельский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры водного транспорта леса и гидравлики АГТУ. Имеет 6 печатных работ в области транспорта леса.



Митрофанов Александр Александрович родился в 1941 г., окончил в 1964 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета, академик РАЕН. Имеет более 190 печатных работ в области гидродинамики взаимодействия плохообтекаемых тел с жидкостью, механики грунтов, научного обоснования и разработки новых экологически защищенных технологий водного транспорта леса по рекам с недостаточными глубинами.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПЛОСКИХ СПЛОТОЧНЫХ ЕДИНИЦ  
НА МОДЕЛЯХ И В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ**

Исследованы гидродинамические характеристики плоских сплотовых единиц (ПСЕ). Определены коэффициенты сопротивления формы и трения воды движению ПСЕ.

*Ключевые слова:* плоская сплотовая единица, гидродинамическое сопротивление, коэффициенты сопротивления формы и трения.

Водный транспорт леса – отрасль лесной промышленности, основной технологической операцией которой является транспортировка леса (завершающая фаза лесозаготовок) по воде. Однако в последние годы, несмотря на высокую экономическую эффективность этого вида транспорта, доля его в общем объеме лесоперевозок заметно сократилась. Отмена молевого сплава привела к тому, что лесозаготовительные предприятия, примыкающие к малым и средним рекам, оказались отрезанными от транспортных артерий.

В последние годы в качестве альтернативы молевому сплаву на реках Севера получили развитие новые технологии водного транспорта леса на базе плоских сплотовых единиц (ПСЕ) малой осадки и большого объема (конструкции АГТУ [1, 2]). Плоты из ПСЕ хорошо зарекомендовали себя на р. Онеге, Пинеге, Ваге и Северной Двине. Для широкого внедрения новых конструкций плотов и технологий необходимо разработать технику, позво-

ляющую изготавливать и выгружать ПСЕ, а также исследовать их гидродинамические характеристики.

Основные исследования проведены на моделях. Правомерность переноса результатов опыты на натурные условия обеспечена при соблюдении следующих условий.

1. Моделирование выполнено по критерию подобия Фруда в области квадратичной турбулентности. В этих условиях коэффициенты сопротивления практически не зависят от числа Рейнольдса ( $Re = 1,8 \cdot 10^4 \dots 1,03 \cdot 10^5$ ,  $Fr = 0,067 \dots 0,203$ ).

2. По рекомендациям, приведенным в работе [2], масштаб моделирования выбран 1 : 20.

3. Результаты модельных исследований проверены на масштабный эффект, для этого выполнена серия опытов в натуральных условиях.

Исследования на моделях проведены в опытовом бассейне гравитационного типа лаборатории кафедры водного транспорта леса и гидравлики АГТУ. Ширина бассейна 3 м, длина 11 м, глубина 0,35 м. Ширина бассейна не обеспечивала условия неограниченности потока. Имело место ограничение потока по глубине. Соотношение глубины и осадки изменяли от 6 до 35, что соответствовало условиям эксплуатации ПСЕ.

Всего испытано четыре типоразмера моделей ПСЕ в плане:  $0,325 \times 0,325$ ;  $0,225 \times 0,225$ ;  $0,325 \times 0,225$  и  $0,225 \times 0,325$  м. Число рядов модельных бревен варьировали от 1 до 5. Использовали модельные бревна диаметром 10 ... 12 мм и длиной  $325 \pm 2$  и  $225 \pm 2$  мм. Высота выступов шероховатости поверхности составляла 250 мкм.

Для упрощения записи модели ПСЕ использовали шифр, состоящий из заглавной буквы (А, В, С, D), обозначающей типоразмер модели, и цифры, соответствующей числу рядов в модели. Так, А5 читается как модель пятирядной сплочной единицы размерами  $0,325 \times 0,325$  м. Основные типоразмеры моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Модель	Длина, м	Ширина, м	Осадка модели, м
A1	0,325	0,325	0,010
A3	0,325	0,325	0,030
A5	0,325	0,325	0,053
B1	0,225	0,225	0,010
B3	0,225	0,225	0,030
B5	0,225	0,225	0,053
C1	0,225	0,325	0,010
C3	0,225	0,325	0,030
C5	0,225	0,325	0,053
D1	0,325	0,225	0,010
D3	0,325	0,225	0,030
D5	0,325	0,225	0,053

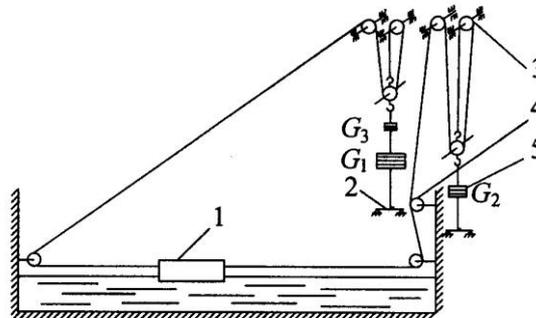


Рис. 1. Схема оборудования опытового бассейна

Для буксировки моделей сплочных единиц применяли трособлочную систему (рис. 1) на базе двух трехкратных ( $i_n = 3$ ) полиспастов, один из которых передавал на модель усилие тяги, другой – усилие торможения. Разгон и равномерное движение модели 1 с достигнутой скоростью осуществляли силой, создаваемой буксировочными грузами  $(G_1 + G_3 - G_2)/i_i$ . В конце периода равномерного движения груз  $G_1$  доходил до подставки 2 и останавливался. В дальнейшем торможение модели до полной остановки выполняли силой  $(G_2 - G_3)/i_i$ . Таким образом, в каждом опыте получали данные о трех режимах движения: разгоне, равномерном движении и торможении моделей. Тросы, прикрепленные к грузам  $G_1$  и  $G_2$ , исключали влияние переменной силы, создаваемой весом тросов, огибающих блоки полиспастов 3. Массу грузов, необходимых для преодоления сил трения в трособлочной системе, определяли тарировкой.

Движение моделей фиксировали специальными датчиками, передающими сигнал на ЭВМ. Для этого на блоке 4 трособлочной системы устанавливали диск с прозрачными и непрозрачными участками, при вращении которого прерывался световой поток от светодиода, излучающего в инфракрасной области спектра. Свет поступал на фотодиоды, фиксирующие световые импульсы. Наличие двух расположенных рядом фотодиодов позволяло определять направление движения. Далее электрический сигнал поступал в микроконтроллер – счетчик импульсов и в случае готовности ЭВМ для приема данных вызывал аппаратное прерывание работы центрального процессора, отправляя подсчитанное число. При поступлении сигнала в ЭВМ драйвер устройства сохранял данные в оперативной памяти. Параллельно с информацией о перемещении фиксировались значения системного таймера ЭВМ. По окончании эксперимента вся информация автоматически сохранялась на диске. Таким образом формировали график изменения скорости перемещения от времени (рис. 2). Цель исследований – установить зависимости для определения гидродинамического сопротивления тела при равномерном движении воды, следовательно, данный график использовали не полностью, а частично: только ту часть, на которой зафиксировано равномерное движение. Шаг дискретизации по перемещению

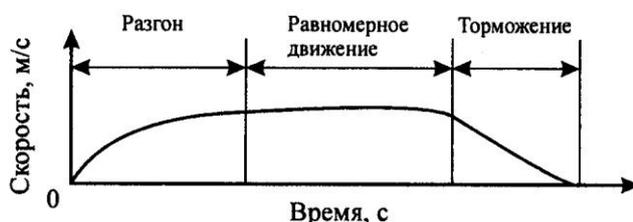


Рис. 2. Схема эксперимента

моделей составляет 0,26 мм, а по времени 55 мс. Максимально возможная фиксируемая скорость для 133 МГц составляет 0,6 м/с, что соответствует при моделировании по критерию подобия Фруда скорости в натуральных условиях 2,7 м/с.

Статистики опытов колеблются в следующих пределах: среднее квадратичное отклонение 0,00082 ... 0,00573 м/с; коэффициент вариации 0,42 ... 3,14; средняя ошибка среднего арифметического 0,00045 ... 0,00243 м/с; показатель точности 0,15 ... 1,40 %.

Гидродинамическое сопротивление воды ( $R$ ) равномерному движению плоской сплочной единицы находили по классической формуле Ньютона

$$R = \zeta \frac{\rho}{2} \Omega v^2, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – общий безразмерный коэффициент сопротивления движению;

$\rho$  – плотность воды;

$v$  – скорость движения;

$\Omega$  – характерная площадь.

Полное сопротивление  $R$  складывается из трех составляющих:

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{в}}, \quad (2)$$

где  $R_{\text{тр}}$  – сопротивление трения;

$R_{\text{ф}}$  – сопротивление формы;

$R_{\text{в}}$  – волновое сопротивление.

Волновая составляющая применительно к рассматриваемому случаю, ввиду малости скоростей, а следовательно, и числа Фруда, не оказывает существенного влияния на полное сопротивление, и ею можно пренебречь. Тогда формула полного сопротивления принимает вид

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ф}}. \quad (3)$$

При установке буксировочных грузов, задаваясь различными значениями сопротивления  $R$ , определяли соответствующие скорости равномерного движения  $v$ . Далее строили графики связи между  $R$  и  $v$  и методом наименьших квадратов отклонений подбирали функции  $R = f(v)$ .

Сопротивление трения для моделей вычисляли по формуле

$$R_{\text{тр}} = \zeta_{\text{тр}} \frac{\rho}{2} S v^2, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь смоченной поверхности модели,  $S = (B + 2T)L$ ;  
 $B, L, T$  – соответственно ширина, длина и осадка модели сплочной единицы;  
 $\zeta_{\text{тр}}$  – коэффициент сопротивления трения от общей шероховатости модели; по формуле Л. Прандтля и Г. Шлихтинга [3]

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

где  $k_s$  – эквивалентная «песочная» шероховатость; по данным [4], для моделей лесотранспортных единиц в масштабе 1 : 10 ... 1 : 50 имеем  $k_s = 5 \cdot 10^{-4}$  м;

$l$  – характерный линейный размер; для рассматриваемого случая  $l = L$ .

При известных  $R$  и  $R_{\text{тр}}$  из выражения (3) для каждой модели определяли сопротивление формы:

$$R_{\text{ф}} = R - R_{\text{тр}}. \quad (6)$$

Коэффициент сопротивления формы подсчитывали по формуле

$$\zeta_{\text{ф}} = \frac{R_{\text{ф}}}{\frac{\rho}{2} B T v^2}. \quad (7)$$

Значения коэффициентов сопротивления трения и формы для различных типоразмеров моделей ПСЕ приведены в табл. 2.

График зависимости коэффициента сопротивления формы  $\zeta_{\text{ф}}$  от безразмерного параметра  $\psi = \frac{T}{B}$  для моделей плоских сплочных единиц приведен на рис. 3. По этим данным методом наименьших квадратов отклонений получена расчетная эмпирическая зависимость

$$\zeta_{\text{ф}} = 0,655 + 0,0315\psi^{-0,833}. \quad (8)$$

Зависимость справедлива для исследованного интервала  $\psi = 0,03 \dots 0,23$ .

Данная зависимость была проверена на адекватность экспериментальным данным при помощи F-критерия Фишера для чисел степеней свободы  $f_{\text{ад}} = 11$  и  $f = 11$  и уровня значимости  $q = 0,05$ . Дисперсия

Таблица 2

Модель	$\zeta_{\text{тр}}$	$\zeta_{\text{ф}}$	Модель	$\zeta_{\text{тр}}$	$\zeta_{\text{ф}}$
A1	0,009	0,94	C1	0,011	1,36
A3	0,009	0,59	C3	0,011	0,81
A5	0,009	0,74	C5	0,011	0,92
B1	0,011	1,05	D1	0,009	1,44
B3	0,011	0,75	D3	0,009	0,85
B5	0,011	0,73	D5	0,009	0,91

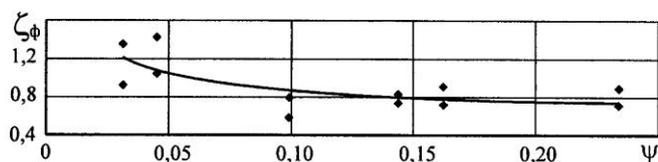


Рис. 3. График зависимости  $\zeta_{\phi} = f(\psi)$  для плоских сплочных единиц

воспроизводимости опытных значений составила 0,0639; дисперсия адекватности 0,0332; расчетное значение F-критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 0,52$ ; табличное  $F_{\text{табл}} = 2,85$ .

Поскольку  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ , была принята гипотеза об однородности дисперсий, а стало быть, адекватности зависимости (8) значениям коэффициентов сопротивления формы, вычисленным по формуле (7). В результате расчетное уравнение для определения полного сопротивления воды движению моделей приняло вид:

$$R = \left( \zeta_{\phi} BT + \zeta_{\text{тр}} L(B + 2T) \right) \frac{\rho}{2} v^2. \quad (9)$$

Поскольку коэффициенты  $\zeta_{\phi}$  и  $\zeta_{\text{тр}}$  безразмерные и исследования проведены в автомодельной области по числу Рейнольдса, формула (9) справедлива также и для натуральных условий. Для подтверждения отсутствия масштабного эффекта проведена натурная проверка результатов исследования.

Цель натуральных испытаний – определение коэффициентов сопротивления формы плоских сплочных единиц и последующее их сравнение с модельными значениями. Испытывали: двухрядную плоскую сплочную единицу размерами  $6 \times 6$  м, трехрядную –  $6 \times 6$  и  $4 \times 6$  м и пятирядную –  $6 \times 6$  м.

Основные показатели ПСЕ приведены в табл. 3. Натурные ПСЕ обозначали буквой Н и цифрой, соответствующей порядковому номеру типоразмера. Например, Н1 означает, что в натуральных условиях была испытана двухрядная сплочная единица размерами  $6 \times 6$  м.

Опыты проводили на свободной от наплавных сооружений акватории рейда Архангельского ЦБК в г. Новодвинске, на расстоянии 80 ... 100 м от берега. Приливы и отливы от Белого моря на рейде позволили провести опыты (как и на моделях) при разных скоростях течения.

Таблица 3

Шифр	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м
Н1	6	6	0,68	0,58
Н2	4	6	0,72	0,61
Н3	6	6	0,50	0,43
Н4	6	6	1,18	0,98

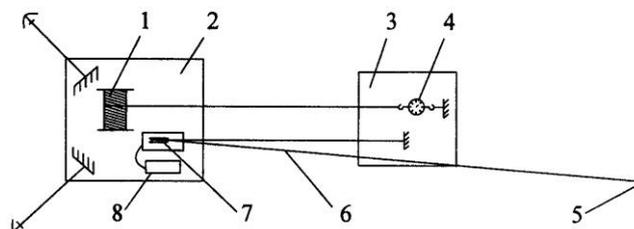


Рис. 4. Расстановка оборудования и приборов при выполнении опытов в натуральных условиях

Размещение оборудования и приборов при проведении опытов показано на схеме (рис.4).

Плоскую плоточную единицу 3 закрепляли за наплавную опору 2. Трос однобарабанной лебедки 1 через динамометр 4 крепили на плоточной единице. Скорость движения измеряли с помощью устройства для фиксации скорости. Вращение контактного блока 7 устройства обеспечивалось огибающим блок нерастяжимым тросом 6. Один его конец закрепляли на плоточной единице, другой – за поплавок 5, который спускали вниз по течению на расстояние 20 ... 30 м. При испытании поплавок двигался в сторону, противоположную течению реки, что обеспечивало необходимое натяжение троса. Данные с контактного устройства поступали на ЭВМ 8. В качестве динамометра 4 использовали, в зависимости от силы влечения потоком, пружинные динамометры типа ДПУ-0,02 и ДПУ-0,2.

Последовательность проведения опыта заключалась в следующем. Для определения силы влечения потоком плоточную единицу спускали вниз по течению на 8 ... 10 м и удерживали в таком состоянии стопором лебедки до полного выбирания слабины троса. Затем выполняли замер по динамометру и результат записывали в журнал измерений. После этого барабан лебедки растормаживали, и плоточная единица под действием силы влечения потоком начинала движение. В это время включали устройство фиксации скорости. По достижении установившегося равномерного движения устройство выключали, включали тормоз лебедки, и плоточная единица останавливалась, после чего лебедкой ее возвращали в исходное состояние. Таким образом, в каждом конкретном опыте получали данные о сопротивлении воды движению плоточной единицы и о скорости движения. Всего проведено 20 опытов, т. е. каждый типоразмер испытывали пять раз.

Одновременно с замером скоростей течения, при самой малой воде, по линии движения плоточной единицы в створе наплавной опоры измеряли глубины. Отношение глубины к осадке плоточной единицы изменялось от 3 до 7. При натурной проверке не исследовали однорядные ПСЕ, у которых отношение глубины к осадке наибольшее, предположительно 12. Это говорит о том, что условия ограниченности потока при натуральных испытаниях адекватны модельным.

Испытания проводили в безветренную погоду. Плотность древесины плоточной единицы подсчитывали как отношение массы к объему.

Таблица 4

Шифр	$\zeta_{тр}$	$\zeta_{ф}$	Шифр	$\zeta_{тр}$	$\zeta_{ф}$
H11	0,008	0,69	H31	0,008	0,64
H12	0,008	0,53	H32	0,008	1,06
H13	0,008	1,07	H33	0,008	1,29
H14	0,008	0,84	H34	0,008	0,72
H15	0,008	0,66	H35	0,008	0,79
H21	0,009	0,77	H41	0,008	0,77
H22	0,009	1,25	H42	0,008	0,76
H23	0,009	0,61	H43	0,008	1,01
H24	0,009	0,47	H44	0,008	0,86
H25	0,009	1,14	H45	0,008	0,73

Массу определяли по динамометру путем взвешивания, объем – как сумму объемов всех бревен в плоской сплочной единице. Осадку замеряли.

По результатам опытов по формуле (7) для ПСЕ находили коэффициент сопротивления формы. При определении сопротивления трения значение  $k_s$  принимали по рекомендациям [4], как для лесоматериалов,  $k_s = 0,005$  м.

Значения чисел Рейнольдса и Фруда изменялись в следующих пределах:  $Re = 11,2 \cdot 10^5 \dots 26,3 \cdot 10^5$ ,  $Fr = 0,029 \dots 0,065$ .

Полученные значения коэффициентов сопротивления формы и трения по результатам натуральных испытаний приведены в табл. 4 (вторая цифра шифра указывает номер опыта, к примеру, H14 обозначает четвертый опыт с ПСЕ размерами  $6 \times 6 \times 0,68$  м).

Значения коэффициента сопротивления формы в зависимости от  $\psi = T/B$  показаны на рис. 5.

Для того чтобы оценить, насколько адекватно зависимость (8) отображает результаты натуральных исследований, определяли F-критерий Фишера для чисел степеней свободы  $f_{ад} = 19$  и  $f = 19$  и уровня значимости

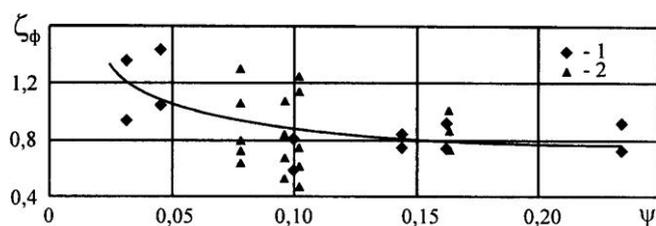


Рис. 5. График зависимости коэффициента сопротивления формы от  $\psi = T/B$ : — – расчетная кривая, полученная по формуле (8); 1 – результаты экспериментальных исследований на моделях; 2 – результаты натуральных испытаний

$q = 0,05$ . Значения статистических оценок составили: дисперсия воспроизводимости опытных значений – 0,0804; дисперсия адекватности – 0,0577;  $F_{\text{расч}} = 1,07$ ;  $F_{\text{табл}} = 2,16$ .

Поскольку  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ , принята гипотеза об однородности дисперсий, а стало быть, адекватности зависимости (8) значениям коэффициентов сопротивления формы, вычисленным по результатам натурных исследований.

Как видно из рис. 5, коэффициенты сопротивления формы для моделей и натуре хорошо согласуются между собой и эмпирической формулой, подтверждая отсутствие масштабного эффекта. Следовательно, зависимости (5), (8) и (9) могут быть использованы для одно- пятирядных ПСЕ, длина и ширина которых изменяется от 4,5 до 6,5 м, при скоростях буксировки от 0 до 1,5 м/с.

Полученные результаты исследований будут использованы при разработке новых технологий лесосплава по рекам с ограниченными глубинами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов, О.М. Проблемы и перспективы транспортного освоения лесопромышленного комплекса [Текст] / О.М. Соколов, А.А. Митрофанов, В.Л. Рымашевский // Лесн. журн. – 2004. – № 3. – С. 37–43. – (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Митрофанов, А.А. Научное обоснование и разработка экологически безопасного плотового лесосплава [Текст] / А.А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 1999. – 288 с.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг; пер. с нем. – М.: Наука, 1969. – 742 с.
4. Худоногов, В.Н. Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды [Текст] / В.Н. Худоногов. – Красноярск, 1966. – 225 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 14.11.05

*O.V. Murashova, A.A. Mitrofanov*

#### **Investigation of Hydrodynamic Characteristics of Flat Raft Sections on Models and in Natural Conditions**

Hydrodynamic characteristics of flat raft sections (FRS) are investigated. The resistance coefficients for forms and water friction to FRS movement are determined.