



УДК 630\*378

**П.Н. Перфильев, А.А. Митрофанов**

Архангельский государственный технический университет

Перфильев Павел Николаевич родился в 1984 г., окончил в 2006 г. Архангельский государственный технический университет, ассистент кафедры водного транспорта леса и гидравлики АГТУ. Имеет 2 печатные работы по исследованиям гидродинамических характеристик линеек из плоских сплотовочных единиц.  
E-mail: perfilievya@mail.ru



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 220 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.  
E-mail: agtusplav@mail.ru



### **ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЕК ИЗ ПЛОСКИХ СПЛОТОВОЧНЫХ ЕДИНИЦ**

Рассмотрены методика проведения экспериментальных исследований, математическое планирование. Приведены зависимости для определения коэффициентов сопротивления, гидродинамического сопротивления.

*Ключевые слова:* плоская сплотовочная единица, эксперимент, линейка, гидродинамическое сопротивление, коэффициент сопротивления.

Объемы лесозаготовок при огромных расстояниях вывозки древесины сдерживаются отсутствием в большинстве регионов страны магистральных видов транспорта – железнодорожного и водного, автомобильный экономически не окупается. Ранее существовал молевой сплав по малым рекам. Затем выполнялись навигационная сплотка древесины и плотовой сплав по большим рекам. С отменой молевого сплава упали объемы лесозаготовок.

Одним из путей решения проблемы является разработка новых экологически чистых технологий лесосплава на базе плоских сплотовочных единиц (ПСЕ) с осадкой 0,25...1,10 м. Такие научные исследования проводятся в Архангельском государственном техническом университете. По р. Онеге, Пинеге, Ваге, Сев. Двине осуществлен опытный проплав плотов из ПСЕ. Предложены конструкторские решения по техническому обеспечению новых технологий. Изучаются гидродинамические и инерционные характеристики новых лесотранспортных единиц.

Внедрение новых технологий позволит расширить сроки навигации, снизить до минимума аварийность на лесосплавных путях и обеспечить более ритмичную и равномерную работу лесозаготовительных предприятий и флота. При этом потребуются меньше техники и флота, работа может быть организована в спокойном режиме, без оглядки на сжатые сроки стояния сплавных горизонтов воды, упадут тарифы на буксировку древесины.

Важным этапом в организации лесосплава по новым технологиям является вывод древесины по всем малым рекам, где раньше был молевой сплав. В зависимости от условий реки это может быть осуществлено в плоточных единицах вольницей, линейках из ПСЕ и малых плотках. В настоящей работе приводятся результаты исследования гидродинамических характеристик линеек из ПСЕ, что позволит эффективнее выполнять технологические и транспортные расчеты.

Авторами разработана методика проведения экспериментальных исследований [5, 6]. Из модельных бревен (длина  $325\pm 2$  и  $225\pm 2$  мм, диаметр 10...11 мм) изготовлены модели линеек. На рис. 1 для примера представлена линейка, состоящая из восьми трехрядных ПСЕ (ширина линейки 0,325 м, длина 2,6 м, расстояние между ПСЕ 0,025 м). Моделирование осуществлено по критерию подобия Фруда в автомодельной области чисел Рейнольдса. Масштаб моделирования принят на первом этапе по рекомендациям [2, 4, 8].

Экспериментальные исследования проведены в масштабе 1:20 в опытовом бассейне кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Ширина бассейна 3, длина 14, глубина 0,4 м. Ширина обеспечивала неограниченность потока. В некоторых опытах поток был ограничен по глубине. Отношение глубины бассейна к осадке моделей изменялось в пределах 6...35. Данное положение не считается проблемным, так как и в натуральных условиях линейки плотов будут сплавляться при малых глубинах.



Рис. 1. Модель линейки

Буксировку моделей из ПСЕ выполняли при различных скоростях, соответствующих натурным от 0,5 до 1,5 м/с. При каждом значении скорости, определяемой величиной буксирующего груза, опыт повторяли 5 раз в серии, согласно рекомендациям [2–4]. Всего по установившемуся движению обработано 600 серий замеров, или 3000 опытов. Для оценки точности опытов найдено среднее квадратичное отклонение, коэффициент вариации, средняя ошибка среднего арифметического и показатель точности, равный 0,00...0,61 %.

Воспроизводимость опытов оценивали по критерию Кохрена. Сделан вывод о достаточно высокой точности измерений.

В опытах использованы математические методы планирования экспериментов с получением уравнения регрессии и классическая методика с применением теоретических зависимостей. Многофакторный эксперимент выполнен в целях изучения качественного и количественного влияния факторов на сопротивление воды движению моделей. Основными факторами, влияющими на гидродинамическое сопротивление воды движению модели линейки из ПСЕ, приняты ее размеры, интервал между ПСЕ, скорость движения модели, коэффициенты сопротивления и плотность воды. Коэффициенты сопротивления и плотность воды – величины постоянные, являющиеся неуправляющими факторами, скорость движения определяет гидродинамическое сопротивление по зависимости

$$R = rv^2, \quad (1)$$

где  $r$  – приведенное сопротивление воды движению модели линейки;

$v$  – скорость движения.

Получив экспериментальным путем зависимости для определения приведенного сопротивления  $r$ , можно по выражению (1) найти гидродинамическое сопротивление. Поэтому за выходной параметр уравнения регрессии принято приведенное гидродинамическое сопротивление моделей линеек из ПСЕ; за входные управляющие факторы:  $X_1$  – длина;  $X_2$  – ширина;  $X_3$  – осадка модели,  $X_4$  – интервал между ПСЕ. Размеры испытанных моделей линеек приведены в табл. 1.

Уравнение регрессии после обработки экспериментальных данных и расчета коэффициентов регрессии принимает вид

$$r = 5,6275 + 1,3188x_1 + 0,9688x_2 + 2,6425x_3 + 0,4763x_4 + 0,1975x_1x_2 + 0,3988x_1x_3 + 0,4225x_1x_4 + 0,7088x_2x_3 + 0,1563x_3x_4 + 0,1613x_1x_2x_4. \quad (2)$$

Это уравнение проверено на адекватность экспериментальным данным по критерию Фишера. По знаку и величине его коэффициентов оценено воздействие соответствующих факторов на выходной параметр. Установлено, что на приведенное и гидродинамическое сопротивление воды движению моделей линеек наибольшее влияние оказывают осадка и длина, наименьшее – интервал между ПСЕ. Результаты, полученные при математическом планировании эксперимента, использованы при планировании и проведении опытов по классическому эксперименту. В результате выбраны размеры моделей линеек, а также интервалы между ПСЕ в моделях (табл. 2). При этом учтены глубины и извилистость малых лесосплавных рек.

Таблица 1

№ модели линейки	Длина, м		Ширина, м		Осадка, м		Интервал между ПСЕ, м	
	$X_1$	$x_1$	$X_2$	$x_2$	$X_3$	$x_3$	$X_4$	$x_4$
1	0,65	-1	0,225	-1	0,010	-1	0	-1
2	2,60	1	0,225	-1	0,010	-1	0	-1
3	0,65	-1	0,325	1	0,010	-1	0	-1
4	2,60	1	0,325	1	0,010	-1	0	-1
5	0,65	-1	0,225	-1	0,052	1	0	-1
6	2,60	1	0,225	-1	0,052	1	0	-1
7	0,65	-1	0,325	1	0,052	1	0	-1
8	2,60	1	0,325	1	0,052	1	0	-1
9	0,65	-1	0,225	-1	0,010	-1	0,05	1
10	2,60	1	0,225	-1	0,010	-1	0,05	1
11	0,65	-1	0,325	1	0,010	-1	0,05	1
12	2,60	1	0,325	1	0,010	-1	0,05	1
13	0,65	-1	0,225	-1	0,052	1	0,05	1
14	2,60	1	0,225	-1	0,052	1	0,05	1
15	0,65	-1	0,325	1	0,052	1	0,05	1
16	2,60	1	0,325	1	0,052	1	0,05	1

По результатам экспериментальных исследований для каждой модели построена кривая зависимости усилий буксировки ( $R_x$ ) от средних скоростей равномерного движения модели ( $v$ ). Такая зависимость для 4-рядной модели линейки, состоящей из восьми плиток (интервал между ПСЕ 0,05 м, ширина модели 0,325 м, длина 2,6 м) представлена на рис. 2.

Все опыты выполнены в квадратичной зоне сопротивления по числу Рейнольдса, для которой справедлив квадратичный закон сопротивления. Это подтверждается аналогичными исследованиями [2, 4]. Для каждого графика методом наименьших квадратов отклонений подобрана теоретическая кривая вида  $R = av^2$ .

Гидродинамическое сопротивление воды равномерному движению тел на поверхности жидкости рекомендуется находить по классической формуле Ньютона [2–4, 7, 8]:

$$R = c \frac{\rho}{2} \Omega v^2, \quad (3)$$

где  $c$  – общий безразмерный коэффициент сопротивления движению;

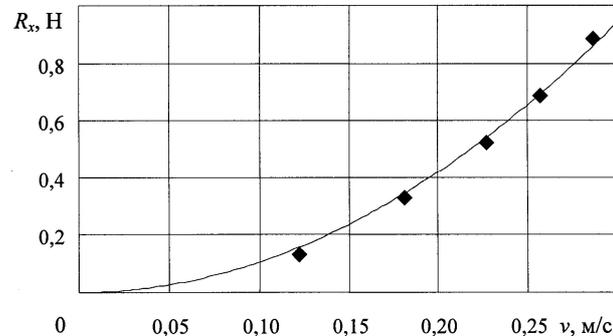
$\rho$  – плотность воды;

$\Omega$  – характерная площадь.

Таблица 2

Параметр модели	Предел варьирования, м	Интервал варьирования, м
Длина	0,65...2,60	0,650
Ширина	0,225...0,325	0,100
Осадка	0,01... 0,05	0,010
Интервал между ПСЕ	0... 0,05	0,250

Рис. 2. Зависимость усилия буксировки от средней скорости равномерного движения модели линейки из ПСЕ



Полное сопротивление складывается из трех составляющих (сопротивление трения ( $R_{тр}$ ), формы ( $R_{ф}$ ) и волновое ( $R_{в}$ ):

$$R = R_{тр} + R_{ф} + R_{в}. \quad (4)$$

При движении тел в жидкости без волнообразования силы тяжести, а следовательно, и числа Фруда ( $Fr$ ) не влияют на гидродинамические характеристики. Это имеет место при движении тела с любой скоростью глубоко под свободной поверхностью, а также при его движении по свободной поверхности с относительно малыми скоростями. Известно [7], что при движении судов с  $Fr < 0,20 \dots 0,25$  волнообразование практически не влияет на гидродинамические силы. Таким образом, критерий подобия по Фруду следует учитывать лишь при движении тел с интенсивным волнообразованием. При равенстве чисел Фруда картина модельного и натурального волнообразования геометрически подобна. Исследования В.П. Корпачева [1] показали, что волновое сопротивление для пучковых плотов начинает проявляться при  $Fr > 0,35$ . В наших условиях исследования выполнены при  $Fr = 0,022 \dots 0,128$ .

Волновая составляющая сопротивления зависимости (4) применительно к рассматриваемому случаю, ввиду малости скоростей, а следовательно, и чисел Фруда, не оказывает существенного влияния на полное сопротивление, и ею можно пренебречь. Тогда формула полного сопротивления воды равномерному движению линейки из ПСЕ примет вид

$$R = R_{тр} + R_{ф}. \quad (5)$$

Во многих исследованиях показано, что сопротивление трения при движении твердого тела в жидкости зависит от скорости движения, размеров тела, шероховатости, а также плотности самой жидкости, в которой происходит движение. Выведена теоретическая зависимость:

$$R_{тр} = c_{тр} \left( \frac{\rho}{2} \right) W v^2, \quad (6)$$

где  $W$  – площадь смоченной поверхности модели,

$$W = (B_m + 2T_m)L_m; \quad (7)$$

$B_m$ ,  $T_m$ ,  $L_m$  – соответственно ширина, осадка и длина модели линейки;

$c_{тр}$  – коэффициент сопротивления трения от общей шероховатости модели.

Для режима с полным проявлением шероховатости, согласно работам Л. Прандтля и Г. Шлихтинга [9], зависимость коэффициентов сопротивления от относительной шероховатости может быть представлена следующей интерполяционной формулой:

$$c_{тр} = \left( 1,89 + 1,621g \frac{l}{k_s} \right)^{-2,5}, \quad (8)$$

где  $l$  – характерный размер (для данного случая длина модели);

$k_s$  – эквивалентная «песочная» шероховатость (для модели линейки из ПСЕ  $k_s = 0,5$  мм [8, 9]).

Из выражения (5)

$$R_{\phi} = R - R_{тр}. \quad (9)$$

Коэффициент сопротивления формы ( $c_{\phi}$ ) определяли по результатам экспериментальных исследований по формуле

$$c_{\phi} = \frac{R_{\phi}}{\frac{\rho}{2} S v^2}, \quad (10)$$

где  $S$  – площадь миделевого сечения модели линейки,

$$S = B_m T_m. \quad (11)$$

Для определения коэффициента сопротивления формы методом наименьших квадратов отклонений получена эмпирическая зависимость

$$c_{\phi} = 0,641 + 0,032 L_m / B_m, \quad (12)$$

которая справедлива при  $L_m / B_m = 2 \dots 13$  (рис. 3).

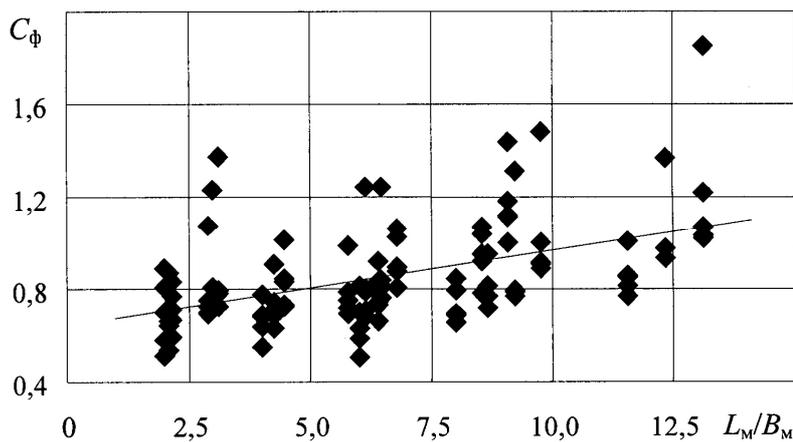


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления формы от отношения длины к ширине модели линейки из ПСЕ

Адекватность зависимости (12) для описания экспериментальных данных подтверждена при помощи критерия Фишера. Поскольку коэффициент  $c_{\phi}$  безразмерный, она справедлива также и для натуральных условий.

Расчетная формула для определения полного сопротивления воды движению линеек из ПСЕ в модельных условиях (справедливая и для натурны) имеет вид

$$R = (c_{\text{тр}} L_{\text{м}} (B_{\text{м}} + 2T_{\text{м}}) + c_{\phi} B_{\text{м}} T_{\text{м}}) v^2. \quad (13)$$

Здесь коэффициент сопротивления трения от общей шероховатости определяется по формуле (8). По рекомендации В.Н. Худоногова [8], для натуральных условий  $l$  равна длине линейки из ПСЕ, а  $k_s = 2,5$  мм.

Результаты исследований гидродинамических характеристик моделей линеек из ПСЕ будут способствовать разработке новых, более совершенных технологий и технического обеспечения лесосплава. Применение таких технологий станет выходом из проблемы транспортировки древесины на большие расстояния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Корпачев, В.П.* Транспорт леса. Теоретические основы водного транспорта леса [Текст]: учеб. пособие для вузов / В.П. Корпачев. – Красноярск: КГТА, 1997. – 254с.
2. *Митрофанов, А.А.* Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение [Текст]: моногр. / А.А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 492 с.
3. *Митрофанов, А.А.* Научное обоснование и разработка экологически безопасного плотового лесосплава [Текст] / А.А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – 268 с.
4. *Мурашова, О.В.* Исследования гидродинамических характеристик плоточных единиц на моделях и в натуральных условиях [Текст] / О.В. Мурашова, А.А. Митрофанов // Лесн. журн. – 2007. – № 1. – С. 45–51. – (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Перфильев, П.Н.* Методика исследований гидродинамических характеристик линеек из плоских плоточных единиц [Текст] / П.Н. Перфильев, А.А. Митрофанов // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – Вып. 73. – С. 192–196.
6. *Перфильев, П.Н.* Проблемы лесосплава и методика исследований гидродинамических и инерционных характеристик линеек из плоских плоточных единиц [Текст] / П.Н. Перфильев, Д.А. Штаборов // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2008. – Ч. 2. – С. 46–49.
7. *Федяевский, К.К.* Гидромеханика [Текст]: учеб. / К.К. Федяевский, Я.И. Войткунский, Ю.И. Фаддеев. – Л.: Судостроение, 1968. – 568 с.
8. *Худоногов, В.Н.* Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды [Текст] / В.Н. Худоногов. – Красноярск; Краснояр. кн. изд-во, 1966. – 225 с.
9. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг; пер. с нем. – М.: Наука, 1969. – 742 с.

Поступила 14.04.08

---

*P.N. Perfiljev, A.A. Mitrofanov*  
Arkhangelsk State Technical University

**Study of Hydrodynamic Characteristics of Bars Made of Flat Raft Sections**

The technique of running experimental research and mathematical planning is considered. The dependencies for determining resistance and hydrodynamic resistance coefficients are provided.

Keywords: flat raft section, experiment, bar, hydrodynamic resistance, resistance coefficient.

---