

УДК 630\*378

**С.В. Самсонов, В.А. Барабанов**

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

Самсонов Сергей Владимирович родился в 1980 г., окончил в 2004 г. «Севмашвуз» филиал С.-Петербургского государственного морского технического университета, старший преподаватель кафедры проектирования подъемно-транспортного и технологического оборудования Института судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет 1 печатную работу в области совершенствования водного транспорта леса и взаимодействия тел с жидкостью.

E-mail: samson-1980@yandex.ru

Барабанов Виктор Александрович родился в 1945 г., окончил в 1967 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, зав. кафедрой водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет более 100 печатных работ в области совершенствования водного транспорта леса и взаимодействия тел с жидкостью.

E-mail: v.barabanov@narfu.ru

## **ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВУЧИХ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Обоснованы технические параметры плавучих контейнеров для транспортировки лесоматериалов. Представлены результаты исследования гидродинамических характеристик плавучих контейнеров.

*Ключевые слова:* лесосплав, пучок, эксперимент, гидродинамические характеристики, коэффициент сопротивления формы и трения.

В связи с запрещением молевого сплава возникли проблемы доставки лесоматериалов из отдаленных лесозаготовительных регионов на лесоперерабатывающие предприятия и занятости населения в лесозаготовительных пунктах. Доставка лесоматериалов железнодорожным и автомобильным транспортом невыгодна, так как потребует строительства железных и автомобильных дорог. Один из способов решения данной проблемы – внедрение новых технологий лесосплава по малым рекам с ограниченными глубинами на базе плавучих контейнеров.

Сотрудниками кафедры водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова предложено использовать твердые плавучие контейнеры для транспортировки лесоматериалов [7].

Внешне контейнер (рис. 1) представляет собой емкость 2 с полуцилиндрическими (возможные варианты – с трапециевидными или треугольными)

бортами 5. Обшивка контейнера выполнена из судовой стали, сверху он имеет трюмный люк 6, который может закрываться жесткой герметичной крышкой 3 (в облегченном варианте – поливиниловым тентом), сдвигающейся по направляющим 4. Загрузка и разгрузка контейнера происходит через люк. Выгружать контейнер из воды можно краном, для этого предусмотрены рамы 1.

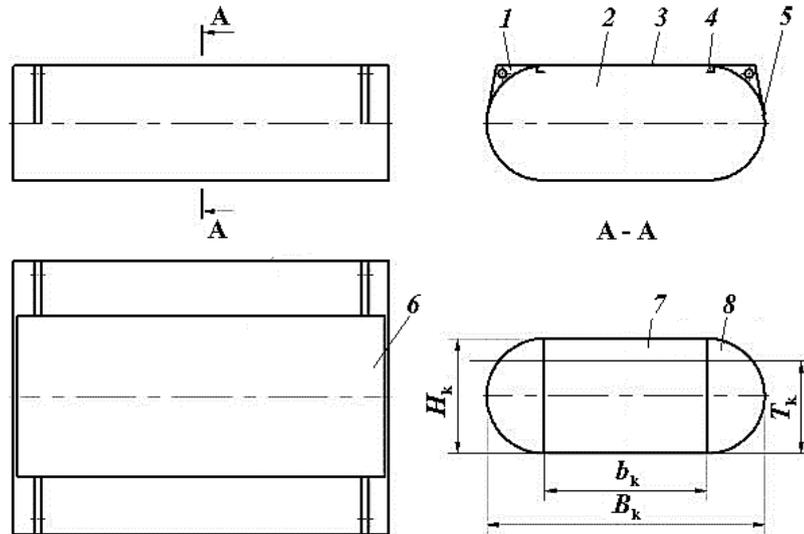


Рис. 1. Общий вид плавучего контейнера ( $H_k$ ,  $T_k$ ,  $b_k$  и  $B_k$  – соответственно высота, осадка, ширина грузовой части и ширина контейнера): 1 – рьма; 2 – коробка; 3 – крышка; 4 – направляющие; 5 – борт; 6 – люк; 7 – грузовая часть; 8 – полости

Внутреннее пространство контейнера при помощи перегородок разделено на грузовую часть 7 и внутренние (изолированные от грузовой части и водонепроницаемые) полости 8, образуемые бортами. В этих полостях размещается система набора.

Такая форма контейнера имеет ряд преимуществ.

1. Простота изготовления, небольшое количество деталей и сварных швов.
2. Плавные обводы при достаточно небольшой трудоемкости изготовления, что положительно скажется на обтекаемости контейнера водой.

3. Наличие боковых, не заполненных грузом полостей позволит разместить в них ребра жесткости, что повысит его жесткость и прочность и позволит выгружать контейнер вместе с грузом на берег, причал, палубу судна и т. д. Его можно будет эксплуатировать при наличии льда (увеличение сроков навигации), что особенно важно для мелководных рек.

4. При минимальной осадке (например, при движении контейнера в порожнем состоянии) у контейнера уменьшается ширина погруженной части, а значит, и коэффициент сопротивления формы, что приведет к снижению затрат на его транспортировку.

Разработаны контейнеры грузоподъемностью 5, 10, 15, 20 и 25 т при длине  $L_k = 6,5$  м. Параметры  $B_k, H_k, b_k, T_k$  и приближенная масса  $m_k$  контейнеров при полной загрузке в зависимости от грузоподъемности  $Q$  представлены в табл. 1. При определении размеров контейнеров исходили из среднего диаметра бревна  $d_{cp} = 0,18$  м [8], его длины  $l_{cp} = 6$  м и плотности древесины  $\rho_{др} = 900$  кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1

$Q, \text{ т}$	$V_{гр}, \text{ м}^3$	$m_k, \text{ т}$	$B_k$	$H_k$	$T_k$	$b_k$
			м			
5	5,56	1,2	2,3	0,7	0,44	1,6
10	11,11	2,1	3,2	1,0	0,62	2,2
15	16,67	3,9	3,7	1,6	0,86	2,1
20	22,22	4,6	4,3	1,8	0,96	2,5
25	27,78	6,5	4,8	2,0	1,10	2,8

Размеры контейнера подбирали следующим образом.

Объем груза в контейнере при его заданной грузоподъемности  $Q$ :

$$V_{гр} = \frac{Q}{\rho_{др}}. \quad (1)$$

Объем одного бревна

$$V_6 = \frac{\pi d_{cp}^4}{4} l_{cp}. \quad (2)$$

Число бревен, которое должно поместиться в контейнере:

$$N_6 = \frac{V_{гр}}{V_6}. \quad (3)$$

Подставив (1) и (2) в (3), получим

$$N_6 = \frac{4Q}{\pi \rho_{др} d_{cp}^2 l_{cp}}. \quad (4)$$

Далее, исходя из требования обеспечения минимальной осадки, подбирали габаритные размеры контейнера.

Сравним осадку пучка и контейнера при одинаковой массе и объеме перевозимых лесоматериалов.

Объем пучка как эллиптического цилиндра [1]:

$$V_{п} = 0,785bHl_{cp}\rho, \quad (5)$$

где  $b, H$  – ширина и высота поперечного сечения пучка;

$\rho$  – коэффициент полнодревесности пучка, зависящий от диаметра бревен,  $\rho = 0,56 \dots 0,70$  [1].

Отношение осей поперечного сечения пучка

$$C = \frac{b}{H}. \quad (6)$$

Здесь для речных условий  $C \leq 3$  [1].

Высота пучка

$$H = \frac{T}{\gamma'_d k}, \quad (7)$$

где  $T$  – осадка пучка;

$\gamma'_d$  – относительный объемный вес древесины,  $\gamma'_d = 0,9$  [1];

$k$  – коэффициент,  $k = 0,93 \dots 0,95$  [1].

Из выражений (5), (6) и (7) получим

$$H = \frac{V_n}{0,785 b l_{cp} \rho}; \quad (8)$$

$$b = CH; \quad (9)$$

$$T = \gamma'_d k H. \quad (10)$$

Подставим (9) в (8) и проведем вычисления:

$$H = \sqrt{\frac{V_n}{0,785 C l_{cp} \rho}}. \quad (11)$$

Тогда, после подстановки (11) в (10), окончательно имеем

$$T = \gamma'_d k \sqrt{\frac{V_n}{0,785 C l_{cp} \rho}}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены результаты расчетов по формуле (12) для пучков перевозимых лесоматериалов с массой до 25 т (при  $k = 0,94$ ,  $C = 2,25$ ,  $\rho = 0,65$ ,  $\gamma'_d = 0,9$ ).

Таблица 2

$Q$ , т	$T$ , м	$T_k$ , м	$\frac{T - T_k}{T} 100$ , %
5	0,76	0,44	42
10	1,07	0,62	42
15	1,32	0,86	35
20	1,52	0,96	37
25	1,70	1,10	35

Таким образом, осадка контейнера при одинаковых объеме и массе перевозимых лесоматериалов меньше осадки пучка на 35...42 %.

Для широкого внедрения новых технологий лесосплава по малым рекам с ограниченными глубинами на базе плавучих контейнеров для транспортировки лесоматериалов необходимо изучить их гидродинамические характеристики.

Нами была разработана методика проведения экспериментальных исследований гидродинамических характеристик плавучих контейнеров [9].

В качестве экспериментального образца использована модель контейнера грузоподъемностью  $Q = 25$  т (рис. 2), изготовленного из оцинкованной стали.

Рис. 2. Модель плавучего контейнера



Моделирование выполнено по критерию подобия Фруда ( $Fr$ ) в области квадратичной турбулентности. В этих условиях коэффициенты сопротивления практически не зависят от числа Рейнольдса ( $Re = 5,87 \cdot 10^4 \dots 3,53 \cdot 10^5$ ,  $Fr = 0,08 \dots 0,33$ ). В соответствии с рекомендациями [4] основной масштаб моделирования принят 1 : 20.

Эксперимент проведен в бассейне кафедры водного транспорта леса и гидравлики САФУ. Ширина бассейна 3 м, длина 14 м, глубина 0,35 м. Ширина бассейна обеспечивала неограниченность потока. Отношение глубины бассейна к осадке моделей составляло 5,91...15,47. Данные условия не считаются проблемными, так как контейнеры предполагается эксплуатировать на реках с малыми глубинами.

Испытывались также составы из двух контейнеров по схемам счала 1+1 [2].

Буксировку моделей выполняли со скоростями, соответствующими натурным: от 0,89 до 2,68 м/с. Для каждого значения скорости, определяемой параметрами буксируемого груза, опыт повторяли 5 раз в серии, согласно рекомендациям [4–6]. Всего по установившемуся движению обработано 16 серий замеров (или 80 опытов). Статистики опытов варьировали в следующих пределах: среднее квадратичное отклонение 0,0038...0,0092 м/с; коэффициент вариации 0,80...3,01; средняя ошибка среднего арифметического 0,0014...0,0041 м/с; показатель точности 0,36...1,35 %.

Воспроизводимость опытов, оцененная по критерию Кохрена, позволила сделать вывод о достаточно высокой точности измерений.

В опытах использовали метод планирования эксперимента с получением уравнения регрессии и классическую методику с получением теоретических зависимостей. Многофакторный эксперимент выполнен в целях изучения качественного и количественного влияния факторов на сопротивление воды движению моделей. В качестве основных факторов, влияющих на гидродинамическое сопротивление воды движению модели контейнера, приняты: отношение осадки к ширине модели, длина модели, скорость движения модели, коэффициенты

сопротивления, плотность воды. Плотность воды – величина постоянная, не являющаяся управляющим фактором.

Скорость движения определяет гидродинамическое сопротивление воды:

$$R = rv^2, \quad (13)$$

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

$v$  – скорость движения.

Получив экспериментальным путем зависимости для определения приведенного сопротивления  $r$ , можно по выражению (13) найти гидродинамическое сопротивление. Поэтому за выходной параметр уравнения регрессии принято приведенное гидродинамическое сопротивление моделей контейнеров, за выходные управляющие факторы:  $X_1$  – длина,  $X_2$  – отношение осадки к ширине модели,  $X_3$  – скорость. Параметры испытанных моделей контейнеров приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ модели контейнера	L, м		$\psi = T_g/B_k$		v, м/с	
	$X_1$	$x_1$	$X_2$	$x_2$	$X_3$	$x_3$
1	0,335	-1	0,094	-1	0,2	-1
2	0,670	1	0,094	-1	0,2	-1
3	0,335	-1	0,226	1	0,2	-1
4	0,335	-1	0,094	-1	0,6	1
5	0,335	-1	0,226	1	0,6	1
6	0,670	1	0,226	1	0,2	-1
7	0,670	1	0,094	-1	0,6	1
8	0,670	1	0,226	1	0,6	1

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

$$r = 4,861 - 0,438x_1 + 2,184x_2 + 0,899x_3 - 0,205x_1x_2 - 0,438x_1x_3 + 0,472x_2x_3 - 0,205x_1x_2x_3. \quad (14)$$

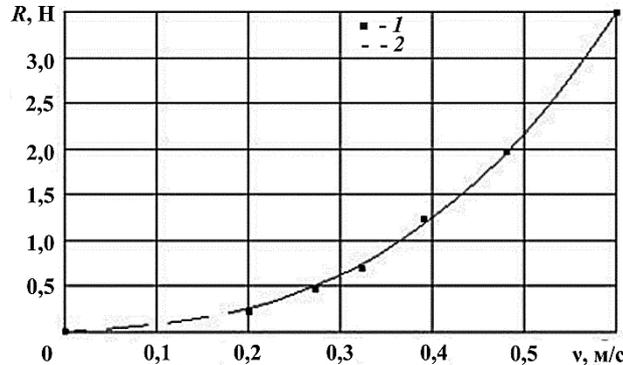
Это уравнение проверено на адекватность экспериментальным данным с помощью критерия Фишера. По знаку и величине его коэффициентов оценено воздействие соответствующих факторов на выходной параметр. Результаты, полученные при математическом планировании эксперимента, использованы при планировании и проведении опытов по классическому эксперименту.

По результатам исследований для каждой модели построена кривая зависимости усилия буксировки ( $R_x$ ) от скорости (средней) равномерного движения модели  $v$ . Такая зависимость для модели контейнера № 3 (табл. 3) представлена на рис. 3.

Опыты выполнены по числу Рейнольдса в квадратичной зоне сопротивления, для которой справедлив квадратичный закон сопротивления. Это подтверждается аналогичными исследованиями [4, 5]. Для каждого графика методом наименьших квадратов отклонений подобрана теоретическая кривая вида

$$R = av^2 + bv^4. \quad (15)$$

Рис. 3. Связь между усилием буксировки  $R$  и скоростью  $v$  равномерного движения модели контейнера № 3 (1) и подобранная теоретическая зависимость вида  $R = 6,11v^2 + 10,13v^4$  (2)



Гидродинамическое сопротивление воды равномерному движению плавучего контейнера по классической формуле Ньютона [4–6, 10–12]

$$R = \zeta \frac{\rho}{2} \Omega v^2, \quad (16)$$

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

$\rho$  – плотность воды;

$\Omega$  – площадь миделевого сечения модели контейнера;

$v$  – скорость движения контейнера.

Полное сопротивление воды равномерному движению тела

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ф}} + R_{\text{волн}}, \quad (17)$$

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

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

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

Исследования показали, что волновое сопротивление начинает проявляться в общем балансе сопротивления при числе  $Fr = 0,14 \dots 0,16$  [3] для судов с полными обводами, к которым можно отнести плавучие контейнеры.

Две последние составляющие, часто объединяют в остаточное сопротивление:

$$R_{\text{ост}} = R_{\text{ф}} + R_{\text{волн}}. \quad (18)$$

С учетом этого полное сопротивление может быть представлено как

$$R = R_{\text{тр}} + R_{\text{ост}}. \quad (19)$$

Тогда

$$R_{\text{ост}} = R - R_{\text{тр}}. \quad (20)$$

Коэффициент сопротивления формы

$$\zeta_{\text{ф}} = \frac{2R_{\text{ост}}}{\rho \Omega v^2}. \quad (21)$$

Сопротивление трения для моделей вычисляли по формуле

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

где  $\zeta_{тр}$  – коэффициент сопротивления трения от общей шероховатости модели;  
 $S$  – площадь смоченной поверхности модели.

Зависимость коэффициента трения от относительной шероховатости, согласно работам Л. Прандтля и Г. Шлихтинга [11], может быть представлена следующей интерполяционной формулой:

$$\zeta_{тр} \left( 1,89 + 1,62 \lg \frac{l}{k_s} \right)^{-2,5},$$

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

$k_s$  – эквивалентная «песочная» шероховатость, для листа оцинкованного железа  $k_s = 6,7 \cdot 10^{-5}$  м.

Для подтверждения отсутствия масштабного эффекта проведена проверка результатов исследования на модели плавучего контейнера размерами  $L_k \times B_k \times H_k = 0,65 \times 0,49 \times 0,2$  м в масштабе 1 : 20.

Перед нами стояла цель – определить коэффициент сопротивления формы модели плавучего контейнера в масштабе 1 : 10 и сравнить его с коэффициентом сопротивления формы модели плавучего контейнера в масштабе 1 : 20.

Значения коэффициента сопротивления формы, вычисленные по зависимости (14) при  $v = 0,2$  м/с и  $L_k = 0,335$  м, представлены на рис. 4.

Чтобы оценить, адекватно ли зависимость (14) отображает результаты исследований в масштабе 1 : 10, определяли критерий Фишера для  $f_{ад} = 10$  и  $f = 10$  и уровня значимости  $q = 0,05$ . Значения статистических оценок составили: дисперсия воспроизводимости опытных значений – 0,03786; дисперсия адекватности – 0,00145;  $F_{расч} = 0,0383$ ;  $F_{табл} = 2,98$ .

Так как  $F_{расч} < F_{табл}$ , принята гипотеза об однородности дисперсий, а значит, и адекватности зависимости (14) коэффициентам сопротивления формы, вычисленным по результатам исследований модели в масштабе 1 : 10.

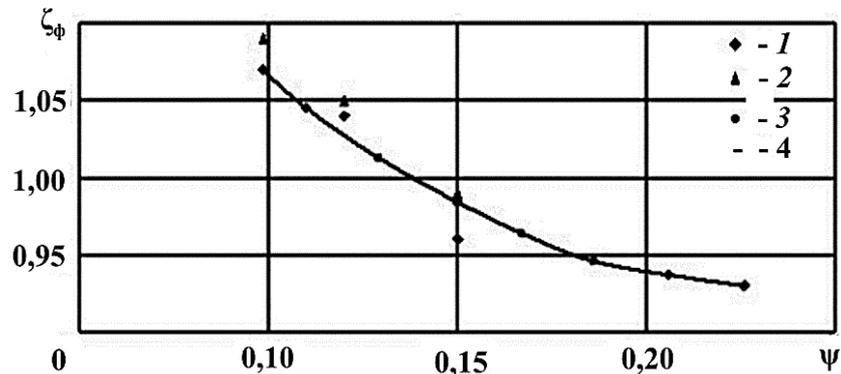


Рис. 4. Зависимость коэффициента сопротивления формы  $\zeta_{ф}$  от  $\psi = T_k/B_k$ : 1, 2 – результаты экспериментальных исследований на моделях в масштабах 1 : 20 и 1 : 10; 3 – точки, полученные при помощи зависимостей (15) и (21); 4 – расчетная кривая, полученная по формуле (15)

Как видно из рис. 4, коэффициенты сопротивления формы для моделей в масштабе 1 : 20 и 1 : 10 хорошо согласуются между собой и уравнением регрессии, что и подтверждает отсутствие масштабного эффекта. Значит зависимость (14) может быть использована для расчета сопротивления формы плавучих контейнеров, длина которых изменяется в интервале  $L_k = 6,5 \dots 13$  м, при скоростях буксировки  $v = 0,89 \dots 2,68$  м/с и отношении осадки к ширине контейнера  $\psi = T_k/B_k = 0,094 \dots 0,226$ .

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бudyка С.Х., Манухин Г.А., Пименов А.Н. Водный транспорт леса и механизация лесосплавных работ: учеб. пособие. Минск: Высш. шк., 1970. 400 с.
2. Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов: учеб. 2-е изд., доп. и перераб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
3. Карпачев В.П. Транспорт леса. Теоретические основы водного транспорта леса: учеб. пособие для вузов. Красноярск: КГТА, 2009. 254 с.
4. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: моногр. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 492 с.
5. Митрофанов А.А. Научное обоснование и разработка экологически безопасного плотового лесосплава. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. 268 с.
6. Мурашова О.В., Митрофанов А.А. Исследования гидродинамических характеристик плоских сплотовых единиц на моделях и в натуральных условиях // Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–51. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Пат. 119332 РФ, МПК В65D 88/12. Контейнер / Суров В.Я., Барабанов В.А., Самсонов С.В.; заявитель и патентообладатель САФУ. № 2012114041/12; заявл. 10.04.2012; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. 3 с.
8. Результаты деятельности ОАО «Соломбальский ЛДК» за 2007 г. Режим доступа: [solombala.com/info/sldk/2007/getfile.php?file=godotch\\_doc](http://solombala.com/info/sldk/2007/getfile.php?file=godotch_doc)
9. Самсонов С.В., Барабанов В.А. Исследование гидродинамических характеристик плавучих контейнеров для транспортировки лесоматериалов // Арктический вектор развития России / к 299-летию ученого: Сб. докл. XXXIX Ломоносовских чтений. Северодвинск: Региональное отделение Союза машиностроителей России, филиал «Севмашвтуз» ГОУ ВПО СПбГМТУ, Северодвинское отделение Ломоносовского фонда, ГРЦАС, 2010. С. 131–135.
10. Федяевский К.К., Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И. Гидромеханика: учеб. Л.: Судостроение, 1968. 568 с.
11. Худогов В.Н. Гидродинамическое взаимодействие плотов и внешней среды. Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1966. 225 с.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Пер. с нем. М.: Наука, 1969. 742 с.

Поступила 19.12.12

*S.V. Samsonov, V.A. Barabanov*

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

**Validation of Technical Parameters of Floating Containers for Timber Transportation and Results of the Study of their Hydrodynamic Properties**

Technical parameters of floating containers for timber transportation are validated. The results of the study of their hydrodynamic characteristics are presented.

*Keywords:* rafting, bundle, hydrodynamic characteristics, friction resistance and drag coefficient

---