

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8203

УДК 004.942, 630.387.33

Статья

Гидродинамическое сопротивление лесотранспортных единиц новой конструкции

Мануковский Андрей Юрьевич

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация),
manu1964@mail.ru*

Шадрина Яна Витальевна

*соискатель учёной степени кандидата наук, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация),
ya.shadrina@narfu.ru*

Получена: 12 ноября 2024 / Принята: 28 ноября 2024 / Опубликовано: 6 декабря 2024

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментальных исследований неустановившегося движения лесотранспортных единиц в условиях влияния мелководья. Для рек с малыми глубинами предложена сплочная единица, состоящая из четырёх пучков малого объёма (до 5 м³), соединённых между собой с помощью крепёжных брёвен и гибких связей. Выполнены экспериментальные исследования движения лесотранспортных единиц в условиях влияния мелководья. Лесотранспортные единицы (ЛТЕ) формировались из 1...6 сплочных единиц. Исследования проводились на моделях масштаба 1:20. Соотношение длины ЛТЕ к её ширине изменялось от 1 до 6. При равномерном движении моделирование выполнено по критерию Фруда в интервале от 0,16 до 0,48, а при неустановившемся — по критериям Фруда и гомохронности. Опыты проведены при числах Рейнольдса $3,1 \cdot 10^4 \dots 5,5 \cdot 10^5$. Модели буксировались при поперечном расположении лесоматериалов в диапазоне скоростей 0,1...0,3 м/с. Движение моделей фиксировалось бесконтактным оптическим датчиком оборотов. Датчик обеспечивал формирование импульсов, частота повторений которых пропорциональна частоте прохождения тахометрических меток, нанесённых на вращающийся блок со светоотражающим покрытием. Изменение частоты импульсов по времени фиксировалось на компьютере с помощью программы ZetPanel. Для каждой модели получены квадратичные зависимости силы сопротивления воды

равномерному движению лесотранспортных единиц от скорости движения модели. Сопротивление неустановившемуся поступательному движению лесотранспортных единиц представлено как сопротивление воды равномерному движению лесотранспортных единиц и дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении. При исследовании неустановившегося движения лесотранспортных единиц такие величины, как присоединённая масса; масса воды в пустотах лесотранспортных единиц; возникающее дополнительное сопротивление, учитываются коэффициентом нестационарности. Для всех моделей получены зависимости коэффициента нестационарности от относительной скорости движения лесотранспортных единиц при соотношении глубины к осадке 7, 5, 4, 2.7, 1.6. Полученные результаты позволяют определить время и путь разгона лесотранспортных единиц. Можно решать и другие задачи, например, найти необходимую силу разгона для достижения за определённое время заданной скорости движения лесотранспортных единиц.

Ключевые слова: сплottedная единица; неустановившееся движение; сопротивление воды; коэффициент нестационарности

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8203

Article

Hydrodynamic resistance of rafting units of new design

Andrey Manukovsky

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation), mayu1964@mail.ru

Yana Shadrina

PhD applicant, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation), ya.shadrina@narfu.ru

Received: 12 November 2024 / Accepted: 28 November 2024 / Published: 6 December 2024

Abstract: The article presents the results of experimental data analysis of the logs rafting units' unsteady motion under the shallow waters effect. A float unit composed of four small volume bundles (up to 5 cubic meters) linked by the means of the fastening logs and flexible couplings has been proposed for rafting in shallow rivers. As the result of experimental research the mathematical model of hydrodynamic resistance was obtained. The timber transport units (TTU) included from 1 to 6 raft sections. The study was performed with a 1 : 20-scaled model. The length-to-width ratio of the TTU varied from 1 to 6. Froude scaling was performed over the range from 0.16 to 0.46 in case of uniform motion of the TTU. The experiments in unsteady motion conditions were performed using Froude scaling and Ho-criterion. The experiments were performed within the Reynolds number range of $3.1 \cdot 10^4 \dots 5.5 \cdot 10^5$. The models were towed at speeds of 0.1...0.3 m/sec. Quadratic dependences of the water resistance force to the velocity of the uniform motion of the TTU models have been derived. The water resistance in the case of the TTU non-stationary motion is represented as the latter one for the uniform motion plus additional resistance arising during non-stationary motion. The values taken into account as the aggregated nonstationarity coefficient included: entrained water, body of water in the TTU cavities and additional water resistance. Dependences of the nonstationarity coefficient to the relative motion speed for all TTU models at the depth / draft ratios of 7.0; 5.0; 4.0; 2.7; 1.6 have been derived. The results obtained allow the researchers to determine the TTU acceleration time and starting

course. Some additional tasks become solvable. For instance, necessary acceleration force for attainment of a TTU predetermined motion speed can be found.

Keywords: rafting unit; water tractive resistance; nonstationarity factor

1. Введение

На сегодняшний день актуальной проблемой лесного комплекса является транспортировка древесины от места заготовки. Лесные ресурсы, располагающиеся вблизи доступных транспортных путей, уже почти исчерпаны. В свою очередь, удалённые лесные массивы из-за отсутствия необходимой транспортной инфраструктуры не осваиваются.

Традиционно заготовленная древесина поставляется потребителю водным и сухопутным транспортом. Основу водного транспорта составляют судовые перевозки и зимняя береговая сплотка лесоматериалов с дальнейшим выводом их в плоты в весенний период. Для увеличения объёмов транспортировки лесоматериалов по внутренним водным путям необходимо совместно с зимней береговой сплоткой и судовыми перевозками восстановить навигационную сплотку древесины и разработать новые технологии сплава лесоматериалов, которые позволят вновь задействовать малые и средние реки. Для организации сплава по малым и средним рекам необходимы лесотранспортные единицы (ЛТЕ), обладающие малой осадкой, при этом имеющие высокие коэффициент полнодревесности и прочность. Также стоит отметить изменения, связанные с качественным составом лесных ресурсов. Доля лиственных пород постепенно увеличивается, что в перспективе должно привести к развитию технологий использования лиственной древесины.

Всем вышеперечисленным требованиям отвечает разработанная сплоточная единица (СЕ) [11], состоящая из четырёх пучков малого объёма (до 5 м³), соединённых между собой с помощью крепёжных брёвен 3 и гибких связей 4, закреплённых фиксаторами 5 (рисунок 1).

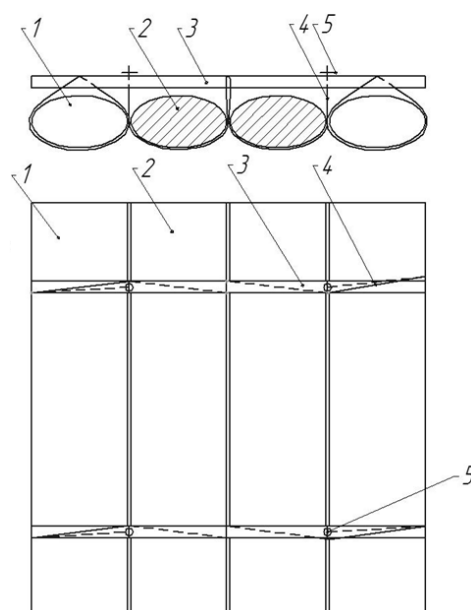


Рисунок 1. Сплоточная единица [рисунок авторов]

Figure 1. A float unit

Конструкция СЕ позволяет сплавливать листовые сортаменты. При этом пучки из листовых сортаментов 2 устанавливаются между пучками из хвойных сортаментов 1. К достоинствам исследуемой нами СЕ можно отнести простоту формирования, высокую прочность и довольно большой объём при сравнительно малой осадке. Исследования гидродинамического сопротивления ЛТЕ, состоящих из предложенных СЕ, позволяют разработать научно обоснованные технические решения для лесосплава по малым и средним рекам.

Ранее вопросом организации сплава по рекам с малыми глубинами занимались А. А. Митрофанов [7], В. Я. Харитонов [14], Д. Н. Афоничев [2], А. Ю. Мануковский [6]. Изучению гидродинамических характеристик плоских сплотовых единиц, предназначенных для сплава по рекам с малыми глубинами, посвящены работы П. Н. Перфильева [13], О. В. Мурашовой [8]. В работах Д. Н. Афоничева [1], В. В. Васильева [11] приведены результаты исследований гидродинамических характеристик плотов, содержащих плоские сплотовые единицы стабилизированной плавучести. Особый интерес вызывают работы, связанные с изучением разгона, торможения и остановки ЛТЕ. Одним из первых неустановившееся движение ЛТЕ исследовал В. А. Щербаков [15]. Наиболее основательно данные вопросы отражены в трудах А. А. Митрофанова [8], М. М. Овчинникова [9], А. Ю. Мануковского [5], В. П. Корпачева [4], при развороте ЛТЕ — В. А. Барабанова [3].

Разработанная СЕ обладает конструктивными особенностями, отличающими её от других ЛТЕ, исследуемых ранее другими авторами. Таким образом, будут различными и гидродинамические характеристики. Эти отличия позволяют сделать вывод о целесообразности выполненных нами исследований.

2. Материалы и методы

В статье представлены результаты исследования по неустановившемуся движению, в частности, по разгону ЛТЕ.

Эксперименты по изучению неустановившегося движения ЛТЕ проводились в опытном бассейне гравитационного типа [16]. Его ширина 3 м, длина 14 м, глубина 0,35 м. Размеры бассейна по ширине обеспечивали условия неограниченности потока. ЛТЕ состояли из 1...6 разработанных нами СЕ. Исследования проводились на моделях в масштабе 1:20 (фото 1). Моделирование неустановившегося движения ЛТЕ в этом масштабе считается надёжным, т. к. отсутствие масштабного эффекта было экспериментально подтверждено на моделях и в натуральных условиях [7]. Рассматривался следующий диапазон размеров: высота СЕ $H = 0,05$ м; отношение глубины наполнения бассейна к осадке $h/T = 7, 5, 4, 2,7, 1,6$; отношение длины ЛТЕ к её ширине $L/B = 1...6$. Коэффициент полнодревесности ЛТЕ $\eta = 0,5$.

При равномерном движении моделирование выполнено по критерию Фруда в интервале $0,16...0,48$, а при неустановившемся — по критериям Фруда и гомохронности. Опыты проведены при числах Рейнольдса $3,1 \cdot 10^4 ... 5,5 \cdot 10^5$, где l — длина линейки.

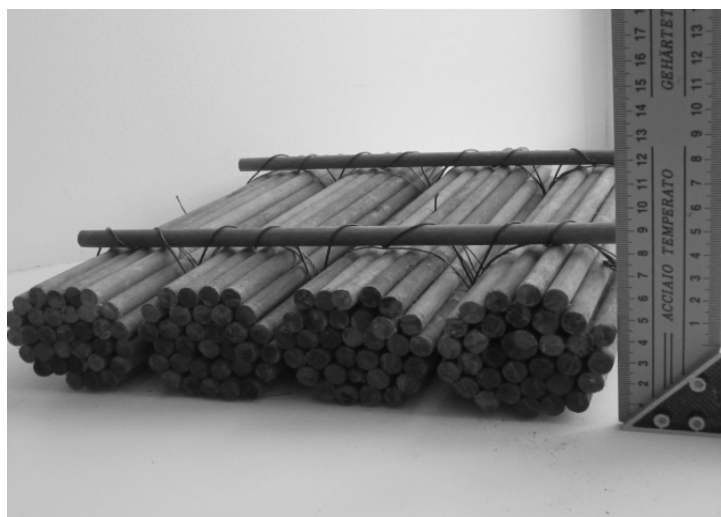


Фото 1. Модель исследуемой сплочной единицы [фото авторов]

Photo 1. Model of the float unit

Модели буксировались при поперечном расположении модельных брёвен. Был задан диапазон скоростей равномерного движения ЛТЕ v_p , 0,1...0,3 м/с, что соответствует натурным условиям — 0,45...1,2 м/с. Заданную скорость устанавливали в зависимости от массы буксируемого груза. Каждый эксперимент проводился не менее пяти раз для каждого значения скорости. В итоге было обработано 750 опытов.

Чтобы передать тяговое усилие, была использована трёхкратная полиспастная система. Эта система состояла из двух полиспастов: один передавал усилие тяги, а второй — усилие торможения. Блоки полиспастов выполнены из оргстекла и установлены на подшипниках. Диаметр каждого блока 100 мм, а толщина 4 мм.

В дальнейшем для сокращения записей эксперименты обозначаются кодом, состоящим из трёх цифр. Первая цифра указывает количество СЕ в ЛТЕ (1 — одна СЕ, 2 — две СЕ и т. д. до 6), вторая — серию экспериментов, т. е. при какой скорости, соответствующей натурной, буксировалась модель (1 — 1,2 м/с; 2 — 1,0 м/с; 3 — 0,8 м/с; 4 — 0,6 м/с; 5 — 0,45 м/с), третья — порядковый номер в серии. Отдельно указывается параметр h/T .

В каждом опыте собирались данные о трёх режимах движения: разгоне, равномерном движении, торможении. Для анализа использовали только данные по разгону и равномерному движению модели. Движение моделей регистрировалось бесконтактным оптическим датчиком оборотов. Датчик создавал импульсы, частота повторения которых была пропорциональна частоте прохождения тахометрических меток, расположенных на вращающемся блоке со светоотражающим покрытием. Изменения частоты импульсов по времени фиксировались на компьютере с использованием программы ZetPanel. Для обработки полученных данных в программном обеспечении Microsoft Office Excel авторы создали макрос на языке Visual Basic for Applications.

Сила сопротивления воды равномерному движению ЛТЕ определяется по формуле

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

где c — безразмерный коэффициент сопротивления движению; ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; Ω — характерная площадь (площадь миделя $B \times T$), м^2 .

Для каждой модели получены зависимости вида $R = av_p^2$ (рисунок 2).

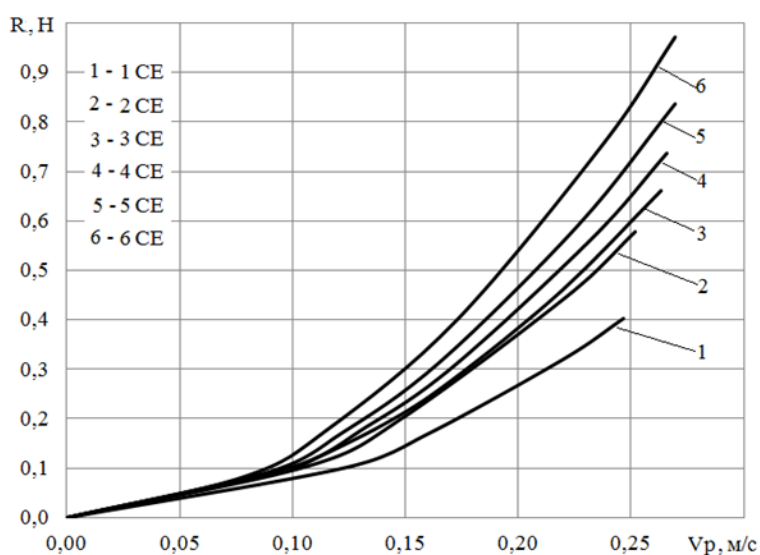


Рисунок 2. Графики зависимости сопротивления воды от скорости движения моделей при $h/T = 5$ [рисунок авторов]

Figure 2. Graphs of the dependence of water resistance on the speed of models movement at $h/T = 5$

Значения параметра a представлены в таблице 1. Коэффициент детерминации 0,99.

Таблица 1. Значение параметра a , $\text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$

Table 1. Value of parameter a , $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2$

H/T	Для ЛТЕ при L/B					
	1	2	3	4	5	6
1,6	10,2	13,7	14,4	14,6	16,2	18,1
2,7	8,9	11,1	12,5	13,7	13,8	15,5
4	8,4	10,0	11,1	11,3	12,1	13,4
5	6,6	9,1	9,5	10,4	11,4	13,4
7	6,5	8,0	8,7	10,0	10,9	13,3

В общем случае главный вектор гидродинамических сил, действующих на объект при движении в вязкой несжимаемой жидкости, определяется как сумма трёх сил: силы плавучести P_p , инерционной гидродинамической силы $P_{ин}$ и вязкостной гидродинамической силы P_{ω} :

$$P = \overline{P_p} + \overline{P_{ин}} + \overline{P_{\omega}}.$$

Равнодействующая сил плавучести и веса ЛТЕ при отсутствии уклона свободной поверхности равна нулю.

Инерционная сила определяется по формуле

$$P_{ин} = \lambda_m \frac{dv}{dt},$$

где λ_m — присоединённая масса; dv/dt — ускорение движения тела, m/c^2 .

Проекция вязкостного компонента главного вектора гидродинамических сил на направление, противоположное поступательной скорости центра тяжести, даёт формулу для силы гидродинамического сопротивления ЛТЕ, определённую уравнением (1). Сила сопротивления при неустановившемся поступательном движении ЛТЕ представляет собой сумму двух сил:

$$R' = R \pm \Delta R_{нест},$$

где R — сопротивление воды равномерному движению ЛТЕ, вычисленное по гипотезе стационарности, Н; $\Delta R_{нест}$ — дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении, Н.

Масса ЛТЕ, определяющая её инерционные характеристики, состоит из суммарной массы древесины, коры и такелажа M_d и некоторой части воды M_B , которая заполняет пространства внутри ЛТЕ.

В соответствии с теоремой об изменении количества движения тела, согласно которой производная по времени от количества движения тела равна главному вектору всех действующих на тело сил:

$$\frac{d(M_d + M_B + \lambda_m) \cdot v}{dt} = -F + P, \quad (2)$$

где F — главный вектор внешних сил, Н.

Взаимозависимые переменные λ_m , M_B , и $\Delta R_{нест}$ изменяются при различных режимах движения ЛТЕ. Их теоретическое или экспериментальное определение по отдельности невозможно. Коэффициент нестационарности движения n , объединяющий их, определяется следующим образом [8]:

$$n = \frac{\lambda_m + M_B \pm \Delta R_{нест}}{M_d} \frac{dv}{dt}. \quad (3)$$

Эксперименты, проведённые различными авторами [7], [13], показали, что масса воды в ЛТЕ остаётся постоянной при её движении по поверхности воды. В этом случае сила буксировки моделей принимается за главный вектор внешних сил F . С учётом уравнения (3) уравнение (2) принимает следующий вид:

$$M_{\text{д}}(1+n)\frac{dv}{dt} = -R + F. \quad (4)$$

В результате было получено выражение для экспериментального определения значений коэффициента n :

$$n = \frac{F - av^2}{M_{\text{д}} \frac{dv}{dt}} - 1.$$

При известных значениях F , a и $M_{\text{д}}$ для расчёта коэффициента n были определены мгновенные значения ускорения разгона ЛТЕ.

При обработке результатов опытов по разгону моделей были получены зависимости скорости и ускорения модели от времени вида:

$$v = v_p - a_v e^{-qt};$$
$$\frac{dv}{dt} = a_a e^{-qt},$$

где a_v , a_a , q — параметры, определяемые экспериментально.

3. Результаты

Пример результатов обработки разгона ЛТЕ серии опытов 23 при $h/T = 5$ приведён в виде графиков на рисунке 3. Коэффициенты детерминации для первой и второй зависимостей 0,99.

Полученные для всех моделей графики $n = f(v/v_p)$ аппроксимированы линейными уравнениями вида:

$$n = n_1 + n_2 \frac{v}{v_p}, \quad (5)$$

где n_1 , n_2 — параметры эмпирической формулы.

Коэффициенты n_1 и n_2 в уравнении (5) можно представить в виде функции от отношения L/B ЛТЕ (рисунок 4):

$$n_1 = f(L/B), \quad n_2 = f(L/B).$$

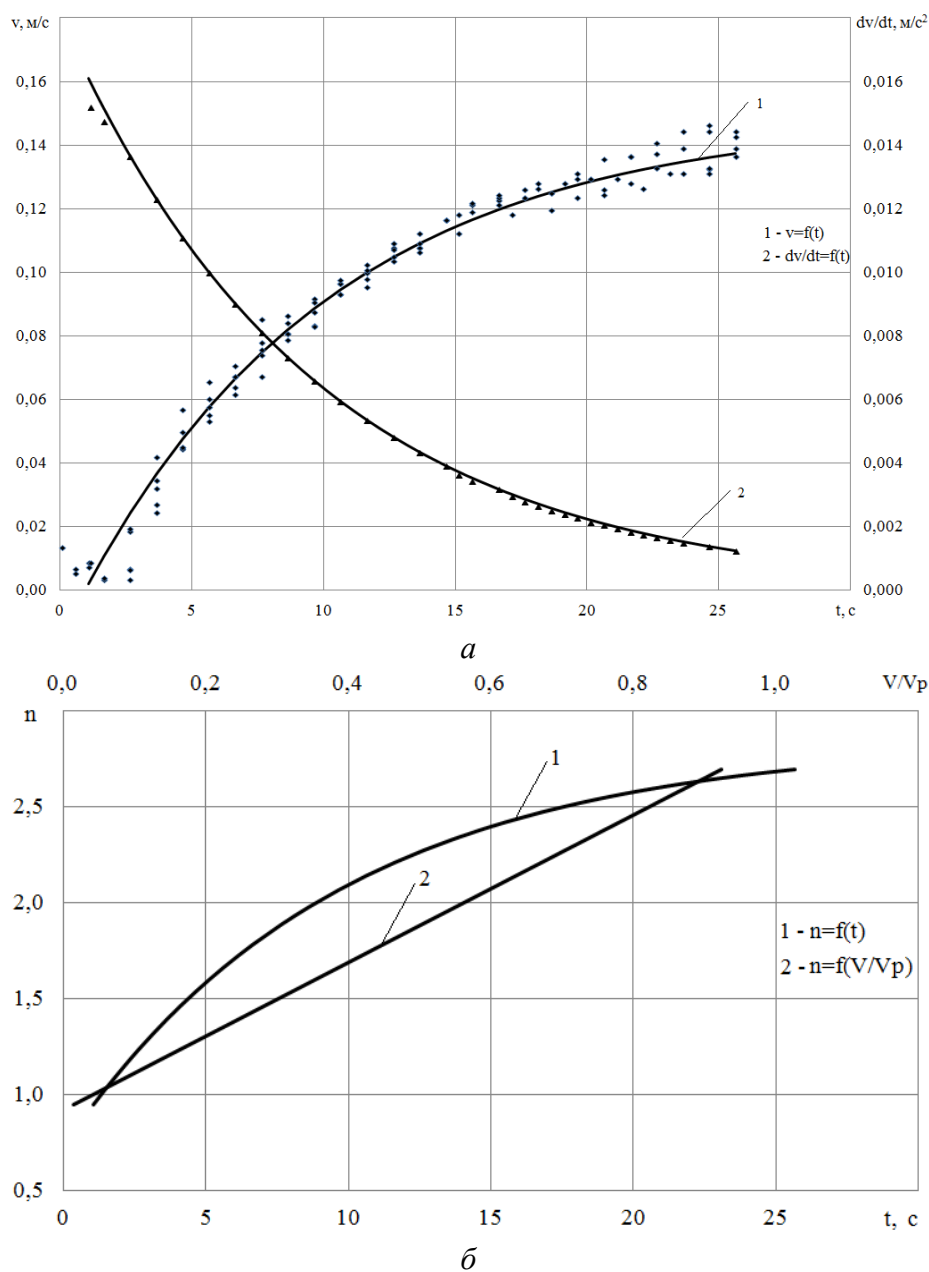


Рисунок 3. Результаты обработки серии опытов 23 по разгону модели при $h/T = 5$: *a* — графики зависимости v , dv/dt от времени t ; *б* — графики зависимости n от безразмерной скорости v/v_p и от времени t [рисунок авторов]

Figure 3. Results of processing the series of experiments 23 on acceleration of the model at $h/T = 5$: **(a)** graphs of the dependence of v , dv/dt on time t ; **(b)** graphs of the dependence of n on the dimensionless speed v/v_p and on time t

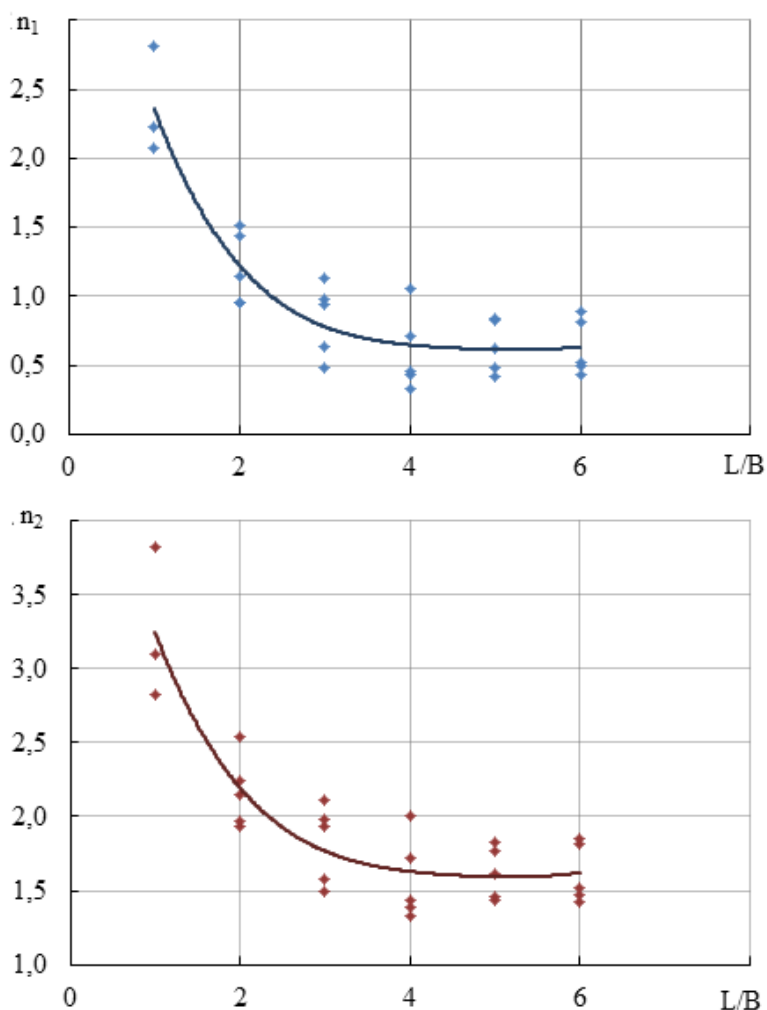


Рисунок 4. Графики зависимости $n_1 = f(L/B)$; $n_2 = f(L/B)$ при $h/T = 1,6 \dots 7,0$ [рисунок авторов]

Figure 4. Graphs of dependence $n_1 = f(L/B)$; $n_2 = f(L/B)$ при $h/T = 1,6 \dots 7,0$

Для каждой модели были определены значения коэффициентов n_1 и n_2 при отношении h/T в указанном диапазоне от 1,6 до 7,0, при котором влияние дна на гидродинамическое сопротивление отсутствует (таблица 2).

По результатам экспериментальных исследований обработано 134 серии опытов разгона ЛТЕ и получены расчётные формулы для определения коэффициентов n_1 и n_2 , справедливые для отношений h/T от 1,6 до 7:

$$\begin{aligned} n_1 &= 0,01(L/B)^4 - 0,19(L/B)^3 + 1,23(L/B)^2 - 3,70L/B + 5,02 \\ n_2 &= 0,01(L/B)^4 - 0,17(L/B)^3 + 1,12(L/B)^2 - 3,38L/B + 5,67 \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициенты детерминации при этом $r^2 = 0,86$ и $r^2 = 0,81$ для $n_1 = f(L/B)$ и $n_2 = f(L/B)$ соответственно.

Таблица 2. Значения коэффициентов n_1 и n_2

Table 2. Values of coefficients n_1 и n_2

H/T	L/B	n_1	n_2	H/T	L/B	n_1	n_2
1,6	1	2,23	3,10	2,75	1	2,07	2,83
	2	1,14	2,15		2	1,44	2,24
	3	0,63	1,58		3	0,95	1,94
	4	0,45	1,39		4	1,05	2,01
	5	0,63	1,61		5	0,85	1,77
	6	0,53	1,52		6	0,89	1,85
4	1	2,816	3,83	5	1	—	—
	2	1,509	2,54		2	0,952	1,97
	3	1,136	2,11		3	0,4881	1,49
	4	0,717	1,72		4	0,4298	1,43
	5	0,831	1,83		5	0,4267	1,43
	6	0,814	1,82		6	0,4973	1,47
7	1	—	—				
	2	0,96	1,94				
	3	0,98	1,98				
	4	0,33	1,33				
	5	0,49	1,46				
	6	0,43	1,42				

Задаваясь размерами ЛТЕ и используя формулы (5) и (6), можно определить коэффициент n для любой величины безразмерной скорости v/v_p .

Результаты экспериментальных исследований по определению n_1 и n_2 на «глубокой» воде ($h/T = 7$) сопоставимы с результатами, полученными А. А. Митрофановым [7].

4. Обсуждение и заключение

Надёжная транспортировка ЛТЕ возможна при условии их управляемости. Это особенно важно в речных условиях при расхождении со встречными судами, на поворотах и участках с поперечным течением. Управляемость ЛТЕ достигается при скорости буксировки относительно потока от 0,4 до 0,9 м/с. При проведении технологических расчётов переместительных операций с ЛТЕ необходимо знать время и путь разгона ЛТЕ до скорости, при которой обеспечивается их управляемость.

Полученные результаты и решения уравнения (4) позволяют определить время и расстояние, которое требуется для разгона лесотранспортных средств. Также можно решить другие задачи, например, вычислить необходимую силу разгона для достижения определённой скорости движения ЛТЕ, близкой к равномерной, за конкретный период времени.

Список литературы

1. *Афоничев Д. Н., Папонов Н. Н., Васильев В. В.* Сплоточная единица стабилизированной плавучести // ИВУЗ «Лесной журнал». 2010. № 6. С. 114—120.
2. *Афоничев Д. Н., Васильев В. В., Папонов Н. Н.* Совершенствование конструкции плота для сплава древесины по рекам с малыми глубинами // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). 2012. № 76 (2). С. 1—10. Текст: электронный.
3. *Барабанов В. А.* Исследование разворота лесотранспортной единицы при неустановившемся режиме движения // Материалы Всерос. конф. «Химико-лесной комплекс / Проблемы и решения». Красноярск, 2002. С. 71—76.
4. *Корпачев В. П.* Общий вид дифференциальных уравнений движения лесотранспортных единиц в водном потоке // Технология, комплексная механизация лесозаготовительных работ и транспорт леса. Л.: ЛТА, 1972. С. 112—117.
5. *Мануковский А. Ю., Подойницын К. С., Завершинская О. В.* Исследование гидродинамического сопротивления движению сортиментных плотов // Лесотехнический журнал. 2011. № 3. С. 83—87.
6. *Мануковский А. Ю., Макаров Д. А.* К вопросу о сплаве леса по рекам с малыми глубинами // Леса России в XII веке: Материалы Девятой междунар. научно-техн. интернет-конф. Сент., 2012 г. СПб., 2012. С. 90—93.
7. *Митрофанов А. А.* Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2007. 492 с.
8. *Мурашова О. В., Митрофанов А. А.* Исследования гидродинамических характеристик плоских плоточных единиц на моделях и в натуральных условиях // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2007. № 1. С. 58—66.
9. *Овчинников М. М., Родионов П. М.* Сопротивление движению хлыстовых плотов // Лесная промышленность. 1979. № 6. С. 28—29.
10. Патент 115769, Р Ф, МПК В 65 G 69/20. Сплоточная единица / Г. Я. Суков, Я. В. Ватлина, Т. М. Шарова. Опубл. 10.05.2012, Бюл. № 13.
11. Патент 2475408 Р Ф, МПК В 63 В 35/62. Плот / Д. Н. Афоничев, В. В. Васильев, Н. Н. Папонов. Опубл. 20.02.2013. Бюл. № 5.
12. *Перфильев П. Н., Митрофанов А. А.* Исследования гидродинамических характеристик линеек из плоских плоточных единиц // Известия вузов. Лесной журнал. Архангельск: САФУ, 2009. № 1. С. 44—51.
13. *Суков Г. Я.* О влиянии массы воды в пустотах пучка брёвен на величину силы удара // Водный транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр. Красноярск: СибТИ, 1977. Вып. 5. С. 15—21.
14. *Харитонов В. Я.* Сборник избранных трудов. Архангельск: САФУ, 2010. 480 с.
15. *Щербаков В. А.* Исследование некоторых вопросов управления плотами при буксировке в речных условиях: Дис. ... канд. техн. наук. Л., 1961. 120 с.
16. *Shadrina Ya. V., Surov G. Ya.* Research on models of the hydrodynamics resistance of timber transport units // International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Austria, 2018. Vol. 18, issue 3.2. P. 425—432.

References

1. Afonichev D. N., Paponov N. N., Vasiliev V. V. The rafting unit of stabilized buoyancy. *Forest journal*, 2010, no. 6, pp. 114—120. (In Russ.)
2. Afonichev D. N., Vasiliev V. V., Paponov N. N. Improving the construction of a raft for timber rafting on rivers with shallow depths. *Polythematic online electronic scientific Journal of the Kuban State Agrarian University (Scientific Journal KubSAU)*, 2012, no. 76 (2), pp. 1—10. Text. Image: electronic. (In Russ.)
3. Barabanov V. A. Investigation of turning maneuver of a timber transporting unit at non-stationary motion. *Proc. All-Russian conf. «Chemical-forest complex / Problems and solutions»*. Krasnoyarsk, 2002, pp. 71—76. (In Russ.)
4. Korpachev V. P. General view of differential equations of motion of timber transport units in a water stream. *Technology, integrated mechanization of logging operations and forest transport*, 1972, pp. 112—117. (In Russ.)
5. Manukovsky A. Yu., Podoynicyn K. S., Zavershinskaya O. V. Investigation of hydrodynamic resistance to motion of the log rafts. *Forestry Engineering Journal*, 2011, no. 3, pp. 83—87. (In Russ.)
6. Manukovsky A. Yu., Makarov D. A. On the issue of rafting forests along rivers with shallow depths. *Forests of Russia in the XII century: Materials of the ninth international scientific and technical Internet conference*. September 2012. Saint Petersburg, 2012, pp. 90—93. (In Russ.)
7. Mitrofanov A. A. Timber rafting. New technologies, scientific and technical support. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2007. 492 p. (In Russ.)
8. Murashova O. V., Mitrofanov A. A. Studies of hydrodynamic characteristics of flat cohesive units on models and in field conditions. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*. Arkhangelsk, SAFU, 2007, no. 1, pp. 58—66. (In Russ.)
9. Ovchinnikov M. M. Resistanse to motion of the tree-long log rafts. *Forest industry*, 1979, no. 11, pp. 28—29. (In Russ.)
10. Surov G. Ya., Vatlina Ya. V., Sharova T. M. R F Patent no. 115769, MPK B 65 G 69/20. The rafting unit. Published 10.05.2012, bull. no. 13. (In Russ.)
11. Afonichev D. N., Vasiliev V. V., Paponov N. N. R F Patent no. 2475408, IPC B 63 B 35/62. The raft. Published 02.20.2013, bull. no. 5. (In Russ.)
12. Perfiliev P. N., Mitrofanov A. A. Studies of hydrodynamic characteristics of lines made of flat cohesive units. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*. Arkhangelsk, SAFU, 2009, no. 1, pp. 44—51. (In Russ.)
13. Surov G. Ya. About effect of mass of water in the voids of a log bundle on impact force. *Water timber transport*. Krasnoyarsk, SibTI Publ., 1977, vol. 5, pp. 15—21. (In Russ.)
14. Kharitonov V. Ya. Collection of selected works. Arkhangelsk, SAFU, 2010. 480 p. (In Russ.)
15. Shcherbakov V. A. Investigation of some issues of raft management during towing in river conditions: Dissertation of the Candidate of technical Sciences. Leningrad, 1961. 120 p. (In Russ.)
16. Shadrina Ya. V., Surov G. Ya. Research on models of the hydrodynamics resistance of timber transport units. *International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM*. Austria, 2018, vol. 18, issue 3.2, pp. 425—432.