



УДК 634.0.378.34

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДЫ ДВИЖЕНИЮ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ ЕДИНИЦ

© *Я.В. Ватлина, асп.*

Г.Я. Суров, канд. техн. наук, проф.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002

E-mail: ya.vatlina@narfu.ru

Для рек с малыми глубинами предложена сплочная единица, состоящая из четырех пучков малого объема (до 5 м³), соединенных между собой с помощью крепежных бревен и гибких связей.

Цель нашей работы – выполнить экспериментальные исследования движения лесотранспортных единиц (ЛТЕ) в условиях мелководья. Лесотранспортные единицы формировали из 1–6 сплочных единиц. Исследования проводили на моделях масштаба 1:20. Отношение длины ЛТЕ к ее ширине изменялось от 1 до 6. При равномерном движении моделирование выполнено по критерию Фруда в интервале от 0,16 до 0,48, при неустановившемся – по критериям Фруда и гомохронности. Опыты проведены при числах Рейнольдса $3,1 \cdot 10^4 \dots 5,5 \cdot 10^5$. Модели буксировали при поперечном расположении лесоматериалов в диапазоне скоростей 0,1 ... 0,3 м/с. Движение моделей фиксировали бесконтактным оптическим датчиком оборотов. Датчик обеспечивал формирование импульсов, частота повторений которых пропорциональна частоте прохождения тахометрических меток, нанесенных на вращающийся блок со светоотражающим покрытием. Изменение частоты импульсов по времени фиксировали на компьютере с помощью программы Zet Panel.

Для каждой модели получены квадратичные зависимости силы сопротивления воды равномерному движению ЛТЕ от скорости движения модели. Сопротивление неустановившемуся поступательному движению ЛТЕ представлено как сопротивление воды равномерному движению ЛТЕ и дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении.

При исследовании неустановившегося движения ЛТЕ такие величины, как присоединенная масса, масса воды в пустотах лесотранспортных единиц, возникающее дополнительное сопротивление, учитываются коэффициентом нестационарности. Для всех моделей получены зависимости коэффициента нестационарности от относительной скорости движения ЛТЕ при отношении глубины к осадке 7,0; 5,0; 4,0; 2,7; 1,6.

Полученные результаты позволяют определить время и путь разгона ЛТЕ. Можно решать и другие задачи, например, найти необходимую силу разгона для достижения за определенное время заданной скорости движения ЛТЕ.

Ключевые слова: сплоченная единица, экспериментальные исследования, неустановившееся движение, сопротивление воды, коэффициент нестационарности, скорость, масса.

Для рек с малыми глубинами предложена сплоченная единица (СЕ) [4], состоящая из четырех пучков малого объема (до 5 м³), соединенных между собой с помощью крепежных бревен и гибких связей (рис. 1). Конструкция СЕ позволяет сплавлять листовые сортименты. При этом пучки из листовых сортиментов устанавливаются между пучками из хвойных.

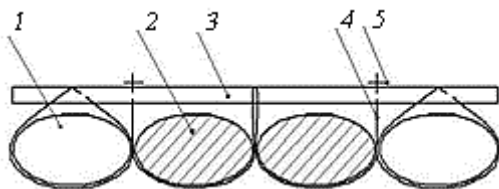


Рис. 1. Сплоченная единица: 1 – пучки из хвойных сортиментов; 2 – пучки из листовых сортиментов; 3 – крепежные бревна; 4 – гибкие связи; 5 – фиксаторы гибких связей

В условиях лаборатории кафедры водного транспорта леса и гидравлики САФУ проводили экспериментальные исследования неустановившегося движения лесотранспортных единиц (ЛТЕ), которые формировали из 1–6 СЕ. Исследования неустановившегося движения плотов выполняли А.А. Митрофанов [2], М.М. Овчинников [3], при развороте лесотранспортных единиц – В.А. Барабанов [1].

Исследования проводили на моделях масштаба 1 : 20. Моделирование неустановившегося движения ЛТЕ при этом масштабе надежно с точки зрения отсутствия масштабного эффекта, что доказано экспериментально на моделях и в натуральных условиях [2]. Диапазон размеров: высота СЕ $H = 0,05$ м; отношение глубины наполнения бассейна к осадке $h/T = 7,0, 5,0, 4,0, 2,7, 1,6$; отношение длины ЛТЕ к ее ширине: $L/B = 1 \dots 6$. Коэффициент полнодревесности ЛТЕ $\eta = 0,5$.

При равномерном движении моделирование выполнено по критерию Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gT}}$ в интервале (0,16...0,48), при неустановившемся – по критериям Фруда и гомохронности $Ho = \frac{vt}{l}$. Опыты проведены при числах Рейнольдса $Re = \frac{vl}{\nu}$ ($3,1 \cdot 10^4 \dots 5,5 \cdot 10^5$).

Здесь v – скорость;
 g – ускорение свободного падения;
 t – время;
 l – длина ЛТЕ.

Модели буксировали при поперечном расположении лесоматериалов и при скорости $v = 0,1 \dots 0,3$ м/с. При каждом значении скорости, определяемой усилием буксировки модели, опыт повторялся не менее пяти раз.

В дальнейшем опыты обозначали шифром, состоящим из трех цифр: первая – номер ЛТЕ (1 – одна СЕ, 2 – две СЕ и т.д. до 6); вторая – серия опытов; третья – порядковый номер в серии.

Движение моделей фиксировали бесконтактным оптическим датчиком оборотов. Датчик обеспечивал формирование импульсов, частота повторения которых пропорциональна частоте прохождения тахометрических меток, нанесенных на вращающийся блок со светоотражающим покрытием. Изменения частоты импульсов по времени фиксировали на компьютере с помощью программы Zet Panel.

Для обработки полученных данных в программном обеспечении Microsoft Office Excel авторами написан макрос посредством Visual Basic for Applications.

Сила сопротивления воды равномерному движению ЛТЕ

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

где c – безразмерный коэффициент сопротивления движению;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

Ω – характерная площадь (площадь миделя $B \times T$), м²;

v_p – средняя скорость модели при равномерном движении, м/с.

Для каждой модели (рис. 2) получены зависимости вида $R = av_p^2$. Значения параметра a приведены в табл. 1. Среднее корреляционное отношение – 0,99.

Таблица 1

h/T	Значение параметра a , Н·с ² /м ² , для ЛТЕ при различных 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
4,0	8,4	10,0	11,1	11,3	12,1	13,4
5,0	6,6	9,1	9,5	10,4	11,4	13,4
7,0	6,5	8,0	8,7	10,0	10,9	13,3

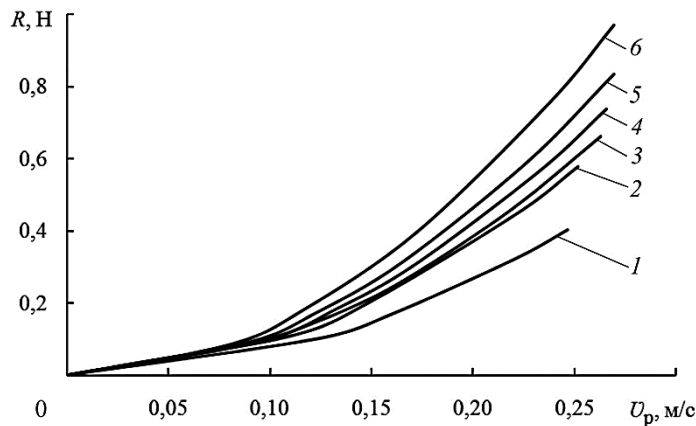


Рис. 2. Зависимость силы сопротивления воды от скорости движения моделей при $h/T = 5,0$ и числа сплочных единиц (номер кривой соответствует числу СЕ)

В общем случае главный вектор гидродинамических сил, действующих на тело при движении в вязкой несжимаемой жидкости, определяется как сумма трех сил: плавучести $P_{\text{п}}$, инерционной гидродинамической $P_{\text{ин}}$, вязкостной гидродинамической $P_{\text{в}}$:

$$P = \overline{P_{\text{п}}} + \overline{P_{\text{ин}}} + \overline{P_{\text{в}}}.$$

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

Инерционная сила определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{ин}} = \lambda_{\text{м}} \frac{dv}{dt},$$

где $\lambda_{\text{м}}$ – присоединенная масса, кг;

$\frac{dv}{dt}$ – ускорение движения тела, м/с^2 .

Проекция вязкостной составляющей главного вектора гидродинамических сил на направление, противоположное поступательной скорости центра тяжести, дает выражение для силы гидродинамического сопротивления ЛТЕ, которое определяли по выражению (1). Сила сопротивления неустановившемуся поступательному движению ЛТЕ представляет собой сумму двух сил:

$$R' = R \pm \Delta R_{\text{нест}},$$

где R – сила сопротивления воды равномерному движению ЛТЕ, вычисленная по гипотезе стационарности, Н;

$\Delta R_{\text{нест}}$ – дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении, Н.

Масса ЛТЕ, характеризующая ее инерционные свойства, складывается из суммарной массы древесины, коры и такелажа M_d и некоторой части воды M_b , заполняющей пустоты внутри ЛТЕ.

Согласно теореме изменения количества движения тела, по которой производная по времени от количества движения тела равняется главному вектору всех действующих на тело сил:

$$[d(M_d + M_b + \lambda_m) v]/dt = -F + P, \quad (2)$$

где F – главный вектор внешних сил, H .

Величины λ_m , M_b и $\Delta R_{\text{нест}}$ взаимозависимы и переменны при разных режимах движения ЛТЕ. Определение их теоретически или экспериментально не представляется возможным. Воспользуемся коэффициентом нестационарности движения n , который объединяет их [2]:

$$n = \frac{\lambda_m + M_b \pm \Delta R_{\text{нест}} \left/ \frac{dv}{dt} \right.}{M_d}. \quad (3)$$

Ряд авторов экспериментально доказали [2, 5], что масса воды в ЛТЕ при движении ее по водной поверхности величина постоянная. В данном случае за главный вектор внешних сил F принимается усилие буксировки модели. С учетом (3) уравнение (2) примет следующий вид:

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

В результате получим выражение для экспериментального определения коэффициента n :

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

Для вычисления коэффициента n при известных значениях F , a и M_d определены мгновенные значения ускорения разгона ЛТЕ.

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

$$v = v_p - a_b e^{-qt};$$

$$\frac{dv}{dt} = a_a e^{-qt},$$

где a_b , a_a , q – параметры, определяемые экспериментально.

Пример результатов обработки разгона ЛТЕ серии опытов 23 приведен на рис. 3. Среднее корреляционное отношение для первой и второй зависимостей – 0,99.

Полученные для всех моделей графики $n = f\left(\frac{v}{v_p}\right)$ аппроксимированы линейными уравнениями вида

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

где n_1, n_2 – параметры формулы.

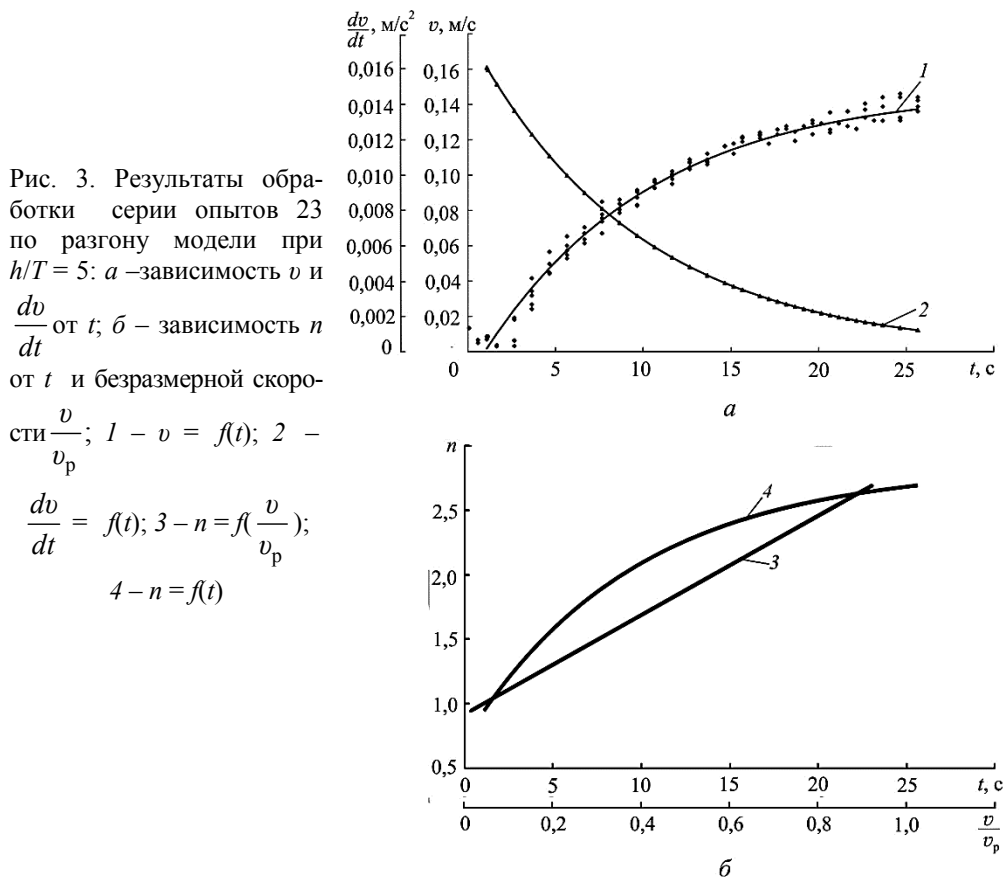


Рис. 3. Результаты обработки серии опытов 23 по разгону модели при $h/T = 5$: а – зависимость v и $\frac{dv}{dt}$ от t ; б – зависимость n от t и безразмерной скорости $\frac{v}{v_p}$; 1 – $v = f(t)$; 2 –

$$\frac{dv}{dt} = f(t); 3 - n = f\left(\frac{v}{v_p}\right);$$

$$4 - n = f(t)$$

Дополнительное сопротивление $\Delta R_{\text{несст}}$ зависит от ширины единицы B , массы λ_m и M_B – от объема и формы погруженной части ЛТЕ. Поэтому коэффициенты n_1 и n_2 в уравнении (5) являются функцией параметра K , представляющей собой сочетание этих величин:

$$n_1 = f_1(K); n_2 = f_2(K);$$

$$K = \frac{B}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} BLT}},$$

где ρ_d – плотность древесины, кг/м³.

Для каждой модели были получены значения коэффициентов n_1 и n_2 при отношении h/T в исследуемом нами диапазоне (рис. 4).

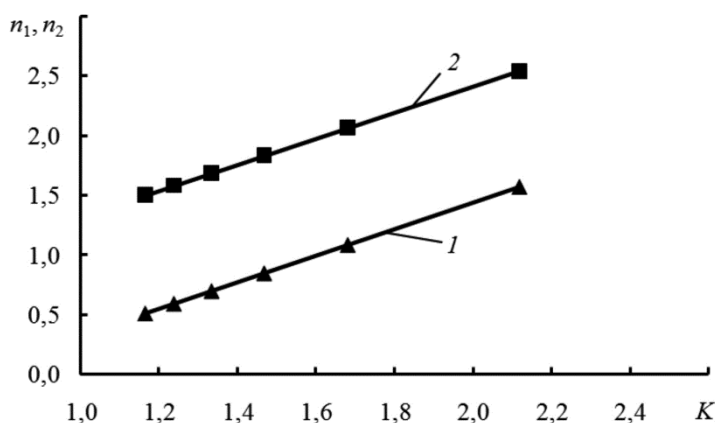


Рис. 4. Зависимость коэффициентов $n_1(1)$ и $n_2(2)$ при $h/T = 1,6 \dots 7,0$

Значения параметра K для моделей приведены в табл. 2.

Таблица 2

L/B	1	2	3	4	5	6
Параметр K для ЛТЕ	2,12	1,68	1,47	1,33	1,24	1,17

По результатам экспериментальных исследований обработано 150 серий опытов разгона ЛТЕ и получены расчетные формулы определения коэффициентов n_1 и n_2 , справедливые для соотношений $h/T = 1,6 \dots 7,0$:

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,11K - 0,79; \\ n_2 &= 1,12K + 0,22. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициент корреляции для этих зависимостей равен 0,75.

Зная параметр K и используя формулы (5) и (6), можно рассчитать коэффициент n для любого соотношения $\frac{v}{v_p}$.

Результаты наших экспериментальных исследований n_1 и n_2 на «глубокой» воде ($h/T = 7,0$) сопоставимы с результатами, полученными А.А. Митрофановым [2].

Используя полученные данные и уравнение (4) [2], можно определять время и путь разгона ЛТЕ. Кроме того, можно решать и другие задачи, например, найти необходимую силу разгона для достижения той или иной скорости движения ЛТЕ, близкой к равномерной за определенное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов В.А. Исследование разворота лесотранспортной единицы при неустановившемся режиме движения // Химико-лесной комплекс: проблемы и решения: материалы Всерос. конф. Красноярск, 2002. С. 71–76.
2. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: моногр. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. 492 с.
3. Овчинников М.М., Родионов П.М. Сопротивление движению хлыстовых плотов // Лесн. пром-сть. 1979. № 6. С. 28–29.
4. Пат. 115769 РФ, МПК В 65 G 69/20. Сплоточная единица / Суров Г.Я., Ватлина Я.В., Шарова Т.М. № 2012100535, заяв. 10.01.12, опубл. 10.05.12, Бюл. № 13.
5. Суров Г.Я. О влиянии массы воды в пустотах пучка бревен на величину силы удара // Водный транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 5. Красноярск: СибТИ, 1977. С. 15–21.

Поступила 04.06.12

The Results of the Study on Water Resistance to the Motion of Timber Transport Units

Ya.V. Vatlina, Postgraduate Student

G.Ya. Surov, Candidate of Engineering, Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, 163002 Arkhangelsk, Russia
E-mail: ya.vatlina@narfu.ru

A raft section consisting of four small volume bundles (up to 5 m³) linked by means of fastening logs and flexible couplings has been proposed for shallow rivers.

Experimental investigations of the motion of timber transport units (TTU) in shallow waters were conducted. TTUs were formed of 1–6 raft sections. The study was performed

using models on a scale of 1:20. The length–beam ratio of the TTU ranged between 1 and 6. At uniform motion of the TTU, modelling was carried out using Froude number ranging between 0.16 and 0.48. At unsteady motion, the experiments were performed using Froude number and homochronicity criterion. The research was conducted at Reynolds numbers ranging between $3.1 \cdot 10^4$ and $5.5 \cdot 10^5$. The models were towed at the speeds from 0.1 to 0.3 m/sec. A non-contact rotational velocity sensor was used to register the motion of the models. The sensor formed impulses at a frequency proportional to the frequency of passing the tachometric marks on the light-reflecting rotating block. Variation of impulse frequency was recorded by means of Zet Panel computer program.

Quadratic dependences of the water resistance force to the uniform TTU motion on the model velocity were derived for each model. Water resistance to TTU's unsteady motion is represented as water resistance to uniform motion plus additional resistance arising at unsteady motion.

The values taken into account as nonstationarity factors were: associated mass, water mass in the voids of TTUs, and additional water resistance. For all TTU models we derived dependences of the nonstationarity factor on the relative motion speed at the following depth–draught ratios: 7.0; 5.0; 4.0; 2.7 and 1.6.

The results obtained allow one to determine TTU's acceleration time and distance. Some additional tasks can be solved, such as determining the acceleration force required to reach a given TTU motion speed in a certain time.

Keywords: raft section, experimental study, unsteady motion, water resistance, nonstationarity factor, velocity, mass.

REFERENCES

1. Barabanov V.A. Issledovanie razvorota lesotransportnoy edinitsy pri neustanovivshemsya rezhime dvizheniya [Study of U-Turn of the Timber Transport Unit at Transient Driving Conditions]. *Khimiko-lesnoy kompleks: problemy i resheniya: materialy Vseros. konf.* Forest-Chemical Complex: Problems and Solutions: Proc. All-Russian Conf. Krasnoyarsk, 2002, pp. 71–76.
 2. Mitrofanov A.A. *Lesosplav. Novye tekhnologii, nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie* [Rafting. New Technologies, Scientific and Technical Support]. Arkhangelsk, 2007. 492 p.
 3. Ovchinnikov M.M., Rodionov P.M. Soprotivlenie dvizheniyu khlystovykh plotov [Resistance to Motion of Tree-Length Rafts]. *Lesnaya promyshlennost'*, 1979, no. 6, pp. 28–29.
 4. Surov G.Ya., Vatlina Ya.V., Sharova T.M. *Splotochnaya edinitsa* [Raft Section]. Patent RF no. 115769.
 5. Surov G.Ya. O vliyaniy massy vody v pustotakh puchka breven na velichinu sily udara [Influence of the Mass of Water in Voids of the Log Truss on the Impact Force Value]. *Vodnyy transport lesa: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Timber Transportation by Water: Inter-university Collection of Sci. Papers]. Iss. 5. Krasnoyarsk, 1977, pp. 15–21.
-