

УДК 630\*378.33

**М.М. Овчинников, В.И. Михасенко**

Овчинников Михаил Михайлович родился в 1930 г., окончил в 1954 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры водного транспорта леса и гидравлики С.-Петербургской лесотехнической академии, заслуженный работник высшей школы, академик РАЕН, действительный член РИА по Карельскому филиалу. Имеет более 150 печатных работ в области технологии водного транспорта леса, мелиорации лесосплавных путей и гидротехнических сооружений.



Михасенко Вячеслав Иванович окончил в 1963 г. Московский инженерно-физический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры водного транспорта леса и гидравлики С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет около 25 печатных работ по вопросам использования математических методов в решении задач неустановившегося движения пучковых сортиментных и хлыстовых плотов.



### **ОБОБЩЕННАЯ ДИАГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПУТИ И ВРЕМЕНИ ОСТАНОВКИ ПУЧКОВЫХ ПЛОТОВ**

На основе решения дифференциального уравнения неравномерного движения пучковых плотов представлена в безразмерной форме обобщенная диаграмма для определения пути и времени их остановки.

*Ключевые слова:* пучковые плоты, определение пути, обобщенная диаграмма.

Цель работы – получить удобную для практического применения диаграмму для расчета пути и времени остановки пучковых плотов постоянной тормозной силой на течении.

Инерционные характеристики пучковых плотов в виде универсальной диаграммы стало возможным обобщить благодаря комплексным исследованиям неравномерного движения плотов, выполненным сотрудниками кафедры водного транспорта леса и гидравлики СПбЛТА [1–5].

Полученные в данной работе результаты основаны на решении дифференциального уравнения неравномерного движения плота, которое устанавливает зависимость изменения скорости его перемещения от массы и действующих на плот сил на этапах разгона и торможения. Это уравнение в подвижной системе координат, связанной с водой, имеет следующий вид:

$$M_{\text{д}} \frac{dV}{dt} = -P_{\text{т}} + iM_{\text{др}}g \pm P_{\text{в}} \mp rV^2, \quad (1)$$

где  $M_{\text{д}}$  – действующая масса плота, кг,

$$M_{\text{д}} = M_{\text{др}} + m_{\text{пр}},$$

$M_{др}$  – масса лесоматериалов плота, кг;

$m_{пр}$  – присоединенная масса, кг;

$V$  – скорость движения плота относительно воды, м/с,

$$V = V_{техн} - V_{теч},$$

$V_{техн}$  – скорость плота относительно берега, м/с;

$V_{теч}$  – скорость течения, м/с;

$P_T$  – постоянная тормозная сила, приложенная к плоту со стороны буксира или других тормозных средств, Н;

$iM_{др}g$  – составляющая силы тяжести плота на направление его движения, Н;

$i$  – уклон свободной поверхности, рад;

$P_в$  – сила воздействия ветра на плот, Н (при попутном ветре – со знаком плюс, при встречном – минус);

$rV^2$  – гидродинамическая сила, замедляющая плот на этапе торможения, когда скорость движения плота относительно воды  $V$  уменьшается от начального значения  $V_0$  до нуля (знак минус), и увлекающая плот на этапе разгона, когда скорость плота  $V$  увеличивается от нуля до равной и противоположно направленной скорости течения  $V_{теч}$  (знак плюс), Н,

$r$  – приведенное сопротивление плота, Н·с<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>,

$$r = C_R \frac{\rho}{2} BT,$$

$C_R$  – коэффициент гидродинамического сопротивления;

$B$  – ширина плота, м;

$T$  – средняя осадка плота, м;

$\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Непосредственное решение уравнения (1) зависит от величин, характеризующих условия движения плота, его конструктивные и гидродинамические параметры, что затрудняет расчет и практическое применение полученных результатов. Поэтому уравнение (1) следует упростить, используя теорию размерности и подобия. Такое решение задачи позволит обоснованно анализировать полученные результаты.

В качестве определяющих величин целесообразно использовать: 1) характерную скорость  $V_* = V_{теч}$ , равную скорости течения реки; 2) характерную силу  $F_* = rV_{\text{да}}^2$ , равную максимальному значению силы влечения плота потоком воды на этапе разгона; 3) характерную массу  $m_* = \rho LBT$  (где  $L$  – длина плота).

В дальнейшем, кроме трех основных, используют еще две величины, выражаемые через основные:

4) характерное время

$$t_* = \frac{m_* V_*}{F_*} = \frac{m_*}{rV_{\text{да}}} = \frac{2L}{C_R V_{\text{да}}} = \frac{10^3 LBT}{rV_{\text{да}}} ;$$

5) характерную длину

$$l_* = \frac{m_* V_*^2}{F_*} = V_* t_* = \frac{m_*}{r} = \frac{2L}{C_R} = \frac{\rho LBT}{r} = \frac{10^3 LBT}{r}.$$

В этом случае удается использовать минимальное число обобщенных параметров и, соответственно, получить удобные для практического использования соотношения, позволяющие определять путь и время остановки плотов.

После приведения уравнения (1) к безразмерной форме оно принимает вид

$$\left( \bar{M}_{\text{др}} + \bar{m}_{\text{пр}} \right) \frac{d\bar{V}}{d\bar{t}} = -\bar{P}_p \mp \bar{V}^2, \quad (2)$$

где  $\bar{M}_{\text{др}} = M_{\text{др}}/m_* = M_{\text{др}}/\rho LBT$ ;  $\bar{m}_{\text{пр}} = m_{\text{пр}}/m_* = \bar{m}_{\text{пр}}/\rho LBT$ ;  $\bar{V} = V/V_* = V/V_{\text{теч}}$ ;

$$\bar{P}_p = P_p/F_* = P_p/rV_*^2 = P_p/rV_{\text{др}}^2; \quad \bar{t} = t/t_* = trV_*/m_* = trV_{\text{теч}}/\rho LBT.$$

В этих формулах  $P_p$  – сила, приложенная к плоту на этапе разгона, равная тормозной силе, т. е.  $P_p = P_T$ .

Разделяя переменные в уравнении (2) и преобразовывая, можно получить выражения для дифференциалов безразмерных величин времени и пройденного пути в зависимости от дифференциала безразмерной скорости:

$$d\bar{t} = \left( \bar{M}_{\text{др}} + \bar{m}_{\text{пр}} \right) \frac{d\bar{V}}{-\bar{P}_p \mp \bar{V}^2}; \quad (3)$$

$$d\bar{l} = \bar{V} d\bar{t} = \left( \bar{M}_{\text{др}} + \bar{m}_{\text{пр}} \right) \frac{\bar{V} d\bar{V}}{-\bar{P}_p \mp \bar{V}^2}. \quad (4)$$

Интегрирование этих уравнений с учетом начальных и конечных значений скоростей движения плота на этапах торможения и разгона, а также изменения приведенной массы плота позволяет получить обобщенные универсальные зависимости для времени и пути остановки плота [1, 3], которые имеют вид:

для безразмерной величины времени остановки

$$\bar{t}_{\text{инд}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{D}_\delta}} \left[ \left( \bar{I}_{\text{др}} + \omega_\delta \right) \arctg \frac{\bar{V}_0}{\sqrt{\bar{D}_\delta}} + 0,5 \left( \bar{I}_{\text{др}} + \omega_p \right) \ln \left( \frac{\sqrt{\bar{P}_p} + 1}{\sqrt{\bar{P}_p} - 1} \right) \right], \quad (5)$$

где  $\bar{t}_{\text{инд}} = \frac{t_{\text{инд}}}{t_*}$ ;  $\bar{V}_0 = \frac{V_0}{V_{\text{др}}}$ ;

для безразмерной величины пути остановки плота относительно берега

$$\bar{l}_{\text{ин}0} = 0,5(\bar{M}_{\text{а}0} + \Omega_0) \ln \left( \frac{\bar{P}_p + \bar{V}_0^2}{\bar{P}_p} \right) + \frac{1}{\sqrt{\bar{P}_p}} (\bar{M}_{\text{а}0} + \omega_0) \arctg \frac{\bar{V}_0}{\sqrt{\bar{P}_p}} + 0,5(\bar{M}_{\text{а}0} + \Omega_p) \ln \left( \frac{\bar{P}_p - 1}{\bar{P}_p} \right) + \frac{0,5}{\sqrt{\bar{P}_p}} (\bar{M}_{\text{а}0} + \omega_p) \ln \left( \frac{\sqrt{\bar{P}_p} + 1}{\sqrt{\bar{P}_p} - 1} \right), \quad (6)$$

где 
$$\bar{l}_{\text{ин}0} = \frac{l_{\text{ин}0}}{l_*}.$$

В формулах (5) и (6) использовано минимальное число обобщенных параметров, а именно:

а) начальная безразмерная скорость потока:  $\bar{V}_0 = \frac{V_0}{V_{\text{д}0}};$

б) обобщенная безразмерная тормозная сила:

$$\bar{P}_p = \frac{P_0 - iM_{\text{а}0}g \pm P_{\text{а}}}{rV_{\text{д}0}^2};$$

в) безразмерная масса потока:

$$\bar{M}_{\text{а}0} = \frac{M_{\text{а}0}}{M_*} = \frac{\rho_{\text{а}0} W_{\text{т}0}}{\rho LBT} = \bar{\rho}_{\text{а}0} k,$$

где  $\bar{\rho}_{\text{а}0} = \rho_{\text{а}0} / \rho$  ( $\rho_{\text{др}}$  – средняя относительная плотность лесоматериалов, кг/м<sup>3</sup>);

$k$  – коэффициент полндревесности потока.

Величины  $\omega_t$ ,  $\Omega_t$  и  $\omega_p$ ,  $\Omega_p$ , характеризующие присоединенную массу потока соответственно в режиме торможения и разгона, подробно рассмотрены в работах [1, 5].

Полученные обобщенные универсальные зависимости позволяют решить задачу по определению пути и времени остановки потока, если известна тормозная сила, скорости потока и течения. Однако они не дают возможности аналитически решать обратные задачи по расчету необходимых значений тормозной силы или начальной скорости потока по известному пути остановки.

При решении этих задач целесообразно использовать графический метод, т. е. построить обобщенную диаграмму связи безразмерной тормозной силы  $\bar{P}_p$  с безразмерной начальной скоростью потока  $\bar{V}_0$  для заданных значений безразмерного пути остановки потока  $\bar{l}_{\text{ин}0}$ . Для этого сначала рассчитывали и строили семейство кривых зависимости  $\bar{l}_{\text{ин}0}$  от  $\bar{P}_p$  при различных  $\bar{V}_0$ . Далее на графике проводили сечения для конкретных значений  $\bar{l}_{\text{ин}0} = \text{const}$ . Снимаемую с этих сечений информацию о значениях  $\bar{P}_p$  и  $\bar{V}_0$

откладывали на координатном поле диаграммы и строили семейство кривых  $\bar{P}_p = f(\bar{V}_0)$  для различных значений параметра  $\bar{l}_{\text{инд}} = \text{const}$ .

На рисунке представлена обобщенная диаграмма для сортиментных плотов, безразмерная масса которых  $\bar{M}_{\text{эд}} = 0,38$  ( $k = 0,45$ ,  $\bar{\rho}_{\text{эд}} = 0,85$ ).

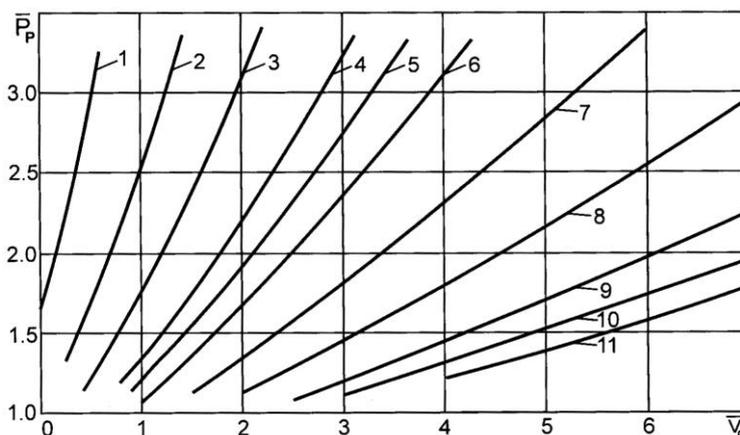
Рассмотрим конкретный сортиментный плот с габаритами  $L = 460$  м,  $B = 54$  м,  $T = 2$  м, движущийся по глубокой спокойной воде со скоростью течения  $V_{\text{теч}} = 0,72$  м/с.

Определим характерные скорость, силу и длину для данного плота:

$$V_* = V_{\text{теч}} = 0,72 \text{ м/с};$$

$$F_* = rV_{\text{эд}}^2 = (910T + 3,5L)BV_{\text{эд}}^2 = (910 \cdot 2 + 3,5 \cdot 460) \cdot 54 \cdot 0,72^2 = 96\,000 \text{ Н};$$

$$l_* = \frac{10^3 LBT}{r} = \frac{10^3 LBT}{(910T + 3,5L)B} = \frac{10^3 \cdot 460 \cdot 2}{910 \cdot 2 + 3,5 \cdot 460} = 268 \text{ м}.$$



Расчетная диаграмма связи тормозной силы  $P_p$  с начальной скоростью движения плота  $V_0$  для различных значений пути остановки плота  $l_{\text{ост}}$ : 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 0,9; 6 – 1,0; 7 – 1,2; 8 – 1,4; 9 – 1,6; 10 – 1,7; 11 – 1,8

Далее найдем необходимую тормозную силу, если начальная скорость движения плота относительно воды  $V_0$  равна 1,8 м/с, а путь остановки не должен превышать 240 м:

$$1) \bar{l}_{\text{инд}} = \frac{l_{\text{инд}}}{l_*} = \frac{240}{268} = 0,894; \quad 2) \bar{V}_0 = \frac{V_0}{V_*} = \frac{1,8}{0,72} = 2,5.$$

По диаграмме определяем  $\bar{P}_p = 2,33$ , тогда

$$P_T = P_p = \bar{P}_p F_* = 2,33 \cdot 96\,000 = 224\,000 \text{ Н}.$$

Затем рассмотрим задачу по установлению начальной скорости плота относительно воды  $V_0$ , если известно значение тормозной силы (определяемой возможностями тормозных средств)  $P_T = 224\,000$  Н, а путь остановки не должен превышать 240 м:

$$1) \bar{l}_{\text{инд}} = \frac{l_{\text{инд}}}{l_*} = \frac{240}{268} = 0,894; \quad 2) \bar{P}_p = \frac{P_{\text{д}}}{F_*} = \frac{224000}{96000} = 2,33.$$

По диаграмме определяем  $\bar{V}_0 = 2,5$ , тогда

$$V_0 = \bar{V}_0 V_* = 2,5 \cdot 0,75 = 1,8 \text{ м/с.}$$

Итак, полученная диаграмма инерционных характеристик позволит значительно упростить решение дифференциального уравнения движения плота, а следовательно, расчет пути и времени его остановки. Она может быть использована для построения диспетчерских графиков буксировки пучковых плотов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников М.М. Решение задачи по остановке плота постоянной силой // Механизация рейдовых и лесоскладских работ: Сб. тр.ЦНИИлесосплава. – М., 1984. – С. 79–88.
2. Овчинников М.М., Михасенко В.И. Об остановке плотов в режиме постоянной тормозной мощности//Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. – Л., 1990. – С. 74–80.
3. Овчинников М.М., Михасенко В.И. Обобщенная зависимость для определения пути и времени остановки пучковых плотов на течении // Там же. – СПб., 1993. – С. 51–54.
4. Овчинников М.М., Михасенко В.И. Сравнение различных методов расчета инерционных характеристик пучковых плотов // Лесн. журн. – 1998. – № 6. – С. 30–36. – (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Овчинников М.М., Михасенко В.И., Михасенко Ю.И. Математическая модель процесса остановки плотов // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. – Л., 1991. – С. 64–70.

С.-Петербургская лесотехническая академия

Поступила 23.04.02

*M.M. Ovchinnikov, V.I. Mikhasenko*

#### **Summarized Diagram for Determining Way and Time of Bundle Rafts' Stop**

Summarized diagram for determining the bundle rafts' stop is presented in a dimensionless form based on the solution of the differential equation of irregular motion.