

УДК 630*378.33.5

В.Я. Харитонов

Архангельский государственный технический университет

Харитонов Виктор Яковлевич родился в 1929 г., окончил в 1952 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета, академик РАЕН. Имеет более 200 печатных трудов в области водного транспорта леса, экологии водных объектов, гидродинамики.
Тел.: (8182) 21-61-50



ИНЕРЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОТОВ, ОСТАНАВЛИВАЕМЫХ ЯКОРЯМИ*

Предложен метод расчета инерционных характеристик плотов при управлении в пути и остановке их якорями с малыми размахом лап и массой. Приведен пример расчета пяти этапов остановки плота.

Ключевые слова: лесосплав, плот, якорь, тормозная сила, тормозной путь, скорость, продолжительность этапа.

Лесосплав как самый дешевый, а в ряде лесоизбыточных регионов единственно возможный вид лесотранспорта постепенно восстанавливает свою значимость в поставках сырья деревообрабатывающим и лесоперерабатывающим предприятиям. Реки, по которым ранее проводили молевой лесосплав, все более интенсивно используют для плотового лесосплава по новым технологиям. Так, Соломбальский ЦБК, применяя разработанную в АГТУ технологию сплава на базе единого транспортного пакета объемом 4...5 м³ [2], увеличил объем зимней сплотки и буксировки плотов по р. Пинеге за последние пять лет в 4 раза.

Принцип единого транспортного пакета позволяет восстанавливать и развивать лесосплав не только по средним, но и по малым рекам в период весеннего половодья плотами небольших габаритов. При этом необходимо научно обосновать как конструкции лесотранспортных единиц, технологии их формирования, так и процессы, связанные с буксировкой плотов.

Предложен, в частности, способ торможения и остановки плотов с помощью оригинальных трубчатых якорей с малыми размахом лап и массой, но большим коэффициентом цепкости – тормозных, способных пропускать через себя грунт [4]. Для окончательной остановки плота используют якоря такой же конструкции, но с днищем – становые, у которых грунт заполняет весь внутренний объем трубы, увеличивая действующую массу якоря.

* Работа выполнена по гранту № 3-05 администрации Архангельской области.

Представляет теоретический и практический интерес анализ инерционных характеристик плота, начиная со сброса тормозных якорей в расчетном створе и заканчивая остановкой плота после сброса станových якорей, т. е. за весь период активного торможения. Конечная цель анализа – определить потребность в тормозных и станových якорях, длину тормозного пути, продолжительность процесса остановки плота.

В известных методиках расчета [1, 3, 5] тормозную силу P рекомендуется принимать в широких пределах:

$$R < P < F_{\max}, \quad (1)$$

где R – суммарная сила влечения плота потоком R_0 , ветром R_B и от уклона R_i свободной поверхности в расчетном створе реки;

F_{\max} – максимально допустимая тормозная сила из условий продольной прочности такелажных креплений плота.

Приближение тормозной силы к правому пределу (1) ведет к завышению потребности в тормозных средствах. При P , близком к R , требуется меньше тормозных средств, но более длинный тормозной путь, что в большинстве случаев не является строгим ограничением. Поэтому если позволяет акватория, то экономически целесообразно в расчетах принимать $P=1,1R$.

В рассматриваемом случае торможения плота якорями силу влечения плота потоком определяют по формуле

$$R'_0 = r(v_p - v_y)^2, \quad (2)$$

где r – приведенное сопротивление воды движению плота при относительной скорости обтекания, равной единице;

v_p – скорость течения в реке;

v_y – скорость плота, при которой бросают станových якоря ($v_y = 0,3 \dots 0,4$ м/с).

Требуемое число тормозных якорей

$$n_{я.т} = \frac{1,1(R'_0 + R_B + R_i)}{F_{я.т}}, \quad (3)$$

где $F_{я.т}$ – держащая сила одного тормозного якоря в движении,

$$F_{я.т} = f_t m_t g, \quad (4)$$

f_t – коэффициент цепкости тормозного якоря;

m_t – его масса;

g – ускорение свободного падения.

Требуемое число станových якорей

$$n_{я.с} = \frac{1,1(R_0 - R'_0 + R_B + R_i)}{F_{я.с}}, \quad (5)$$

где $R_0 = r v_p^2$,

$F_{я.с}$ – держащая сила станového якоря,

$$F_{я.с} = f_c m_c g; \quad (7)$$

f_c – коэффициент цепкости станového якоря;

m_c – его масса.

Численные значения r , R_b , R_i определяют по известным зависимостям [1, 3, 5], которые здесь не приводятся. Коэффициенты цепкости f_t и f_c подлежат экспериментальному исследованию для соответствующих конструкций и массы якорей, а также характера грунта.

Процесс активного торможения плота якорями делится на пять этапов.

Первый этап начинается со сброски тормозных якорей и заканчивается вытяжкой их шейм. На этом этапе плот движется по инерции, скорость его уменьшается мало и может быть принята постоянной, равной технической скорости буксировки плота относительно берега:

$$v_T = v_p + v, \quad (8)$$

где v – скорость буксировки плота в спокойной воде,

$$v = \sqrt{\frac{F_T + R_i + R_b}{r\varphi_M \varphi_b \varphi_V}}; \quad (9)$$

F_T – сила тяги на гаке буксировщика;

φ_M , φ_b , φ_V – коэффициенты, учитывающие влияние на сопротивление движению плота соответственно мелководья, длины буксирного каната, волнения [5].

Длина пути плота за этап может быть принята равной длине шеймы якоря:

$$S_1 = l_{шт}. \quad (10)$$

Продолжительность этапа

$$t_1 = \frac{S_1}{v_T}. \quad (11)$$

Второй этап начинается с запахиания якорей и заканчивается моментом, когда их держащая сила становится наибольшей (условно постоянной). На этом этапе плот тормозится переменной силой P_2 , так как держащая сила якорей увеличивается от нуля до максимальной. Плот движется со скоростью, превышающей скорость течения, дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$M_d \frac{dv}{dt} = -P_2 - r(v_T - v)^2 + R_b + R_i, \quad (12)$$

где M_d – действующая масса плота,

$$M_d = M(1 + n); \quad (13)$$

M – масса плота,

$$M = 1,12\rho_b V_{пл}; \quad (14)$$

ρ_b – плотность бревен;

$V_{пл}$ – объем плота;

1,12 – коэффициент, учитывающий кору;

n – коэффициент нестационарности.

На этом этапе [1]

$$n = -0,137 + 0,443C + 27,16e^{-4,61C}, \quad (15)$$

где
$$C = \frac{B}{\sqrt[3]{\frac{\rho_6}{\rho} LBT}}, \quad (16)$$

ρ – плотность воды;

L, B, T – соответственно длина, ширина, осадка плота;

e – основание натуральных логарифмов.

Последнее слагаемое в формуле (15) можно не учитывать.

Уравнение (12) не решается, поскольку зависимость тормозной силы от времени не установлена и для разных якорей различна. Однако известна длина тормозного пути на этом этапе S_2 , равная длине пути запахиивания якоря $l_{3,т}$, устанавливаемой опытом, т. е.

$$S_2 = l_{3,т}. \quad (17)$$

Этот путь сравнительно невелик, и без большой погрешности переменные величины в уравнении можно считать изменяющимися линейно. Тогда

$$M_d \bar{a} = -\bar{P}_2 - rv^2 + P_c, \quad (18)$$

где \bar{a} – осредненное ускорение торможения на втором этапе,

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_T}{t_2}, \quad (19)$$

v_2 – скорость плота в конце этапа;

t_2 – продолжительность этапа,

$$t_2 = \frac{2l_{3,т}}{v_T + v_2}, \quad (20)$$

тогда

$$\bar{a} = \frac{v_2^2 - v_T^2}{2l_{3,т}}; \quad (21)$$

\bar{P}_2 – осредненная тормозная сила за этап,

$$\bar{P}_2 = \frac{F_{я,т} n_{я,т}}{2}; \quad (22)$$

\bar{v} – осредненная скорость обтекания плота водой за этап,

$$\bar{v} = \frac{v_T - v_p + v_2 - v_p}{2} = \frac{v_T + v_2 - 2v_p}{2}; \quad (23)$$

$$P_c = R_b + R_f. \quad (24)$$

Решая совместно уравнения (18) и (20) с использованием (21)–(24), получаем квадратное уравнение

$$\left(\frac{r}{4} + C\right)v_2^2 + \frac{rB}{2}v_2 + \left(\frac{r}{4}B^2 - Cv_T^2 - A\right) = 0, \quad (25)$$

где обозначено:

$$\left. \begin{aligned} A &= P_c - \frac{F_{я.т} n_{я.т}}{2}; \\ B &= v_t - 2v_p; \\ C &= \frac{M_d}{2l_{3,т}}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Решая уравнение (25), получаем скорость плота в конце второго этапа:

$$v_2 = \frac{-\frac{rB}{2} + \sqrt{\left(\frac{rB}{2}\right)^2 - 4\left(\frac{r}{4} + C\right)\left(\frac{r}{4}B^2 - Cv_t^2 - A\right)}}{2\left(\frac{r}{4} + C\right)}. \quad (27)$$

Продолжительность этого этапа определяют по формуле (20).

Третий этап – скорость плота уменьшается от v_2 до скорости течения в реке v_p . Уравнение движения (12) справедливо, но вместо переменной тормозной силы P_2 действует постоянная P_3 :

$$P_3 = n_{я.т} F_{я.т}, \quad (28)$$

а вместо v_t в уравнении должна быть скорость v_2 . Коэффициент n находят по той же формуле (15).

Этап теоретически достаточно изучен [5]. Его продолжительность

$$t_3 = K_3 \frac{M_d}{\sqrt{r(P_3 - P_c)}}; \quad (29)$$

тормозной путь

$$S_3 = v_p t_3 - \frac{M_d}{r} \ln \frac{\cos K_3}{\cos \left(K_3 - \frac{\sqrt{r(P_3 - P_c)}}{M_d} t_3 \right)}. \quad (30)$$

В формулах (29) и (30)

$$K_3 = \arctg \left(\sqrt{\frac{r}{P_3 - P_c}} (v_2 - v_p) \right). \quad (31)$$

Четвертый этап начинается при скорости плота v_p и заканчивается при скорости $v_я$, характер обтекания плота принципиально иной – скорость плота меньше скорости потока, и уравнение движения имеет вид

$$M_d \frac{dv}{dt} = -P_3 + r(v_p - v)^2 + P_c. \quad (32)$$

Его решение:

$$t = \frac{M_d}{r} \int_{v_я}^{v_p} \frac{dv}{av^2 + bv + c}, \quad (33)$$

где

$$a = -1; \quad b = 2v_p; \quad c = \frac{P_3 - P_c}{r} - v_p^2. \quad (34)$$

Дискриминант $4ac - b^2 < 0$, поэтому после преобразований получим

$$t_4 = \frac{M_d}{2\sqrt{(P_3 - P_c)r}} \ln \left| \frac{(v_p - v_y) \sqrt{\frac{P_3 - P_c}{r} + \frac{P_3 - P_c}{r}}}{(v_p - v_y) \sqrt{\frac{P_3 - P_c}{r} - \frac{P_3 - P_c}{r}}} \right|. \quad (35)$$

Тормозной путь на этапе определим из дифференциального уравнения

$$M_d v \frac{dv}{dS} = -P_3 + r(v_p - v)^2 + P_c \quad (36)$$

или

$$S = \frac{M_d}{ar} \int_{v_y}^{v_p} \frac{v dv}{v^2 + \frac{b}{a}v + \frac{c}{a}}. \quad (37)$$

Дискриминант $\left(\frac{b}{a}\right)^2 - 4\frac{c}{a} > 0$, поэтому после преобразований получим

$$S_4 = -\frac{M_d}{2r} \left(\ln \left| \frac{P_3 - P_c}{r(v_p - v_y)^2} \right| + \frac{2v_p}{\sqrt{\frac{P_3 - P_c}{r}}} \ln \left| \frac{v_p - v_y - \sqrt{\frac{P_3 - P_c}{r}}}{v_p - v_y + \sqrt{\frac{P_3 - P_c}{r}}} \right| \right). \quad (38)$$

Как показано в работе [1], при таком характере обтекания плота коэффициент n в формуле (13) зависит от его скорости и определяется по формуле

$$n = 1 + n_1 + n_2 v_T \sqrt{\frac{r}{P_3 - P_c}}, \quad (39)$$

где $n_1 = 0,469C - 0,369$;

$n_2 = 0,564C - 0,648$;

v_T – мгновенная скорость движения плота относительно берега.

В рассматриваемом случае целесообразно в расчете использовать осредненное значение коэффициента \bar{n} , вычисленное по осредненной скорости за этап:

$$\bar{v}_T = \frac{v_p + v_y}{2}. \quad (40)$$

Пятый этап, как и второй, начинается с запахиивания якорей (но уже станových) и заканчивается остановкой плота, когда суммарная держащая сила всех якорей достигает максимума. Чтобы уменьшить тормозной путь, целесообразно сбросить станových якоря в створе, расположенном на расстоянии $S_1 + S_2 + S_3 + S_4 - l_{ш.с}$ от начального створа (здесь $l_{ш.с}$ – длина шейки станových якорей), тогда якоря начнут запахииваться при скорости плота, равной v_y , и тормозной путь этапа составит:

$$S_5 = l_{ш.с}; \quad (41)$$

продолжительность

$$t_5 = \frac{2l_{3,c}}{v_{я}}. \quad (42)$$

В формулах (41) и (42) $l_{3,c}$ – длина пути запахиивания станового якоря, устанавливаемая опытом.

Полный путь торможения плота

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5,$$

а его продолжительность

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5.$$

В качестве примера рассмотрим процесс остановки северодвинского сортиментного плота габаритами $415 \times 80 \times 1,5$ м, массой $M = 16\ 100$ т при $v_p = 1$ м/с, $v_b = 5$ м/с, $i = 0,0001$, $h_p = 5$ м, $v_r = 1,55$ м/с, $r = 260$ кН·с²/м², $R_i = 18$ кН, $R_b = 10$ кН, $m_T = m_c = 100$ кг, $f_T = 35$, $f_c = 50$.

По формулам (2) и (24) $R'_0 = 127,4$ кН, $P_c = 28$ кН; по формулам (4), (3), (5) $F_{я,T} = 34,3$ кН, $n_{я,T} = 5$ шт., $n_{я,c} = 4$ шт.

Первый этап. Длина шейки рекомендуется равной десяти глубинам в реке $h_p = 5$ м, поэтому по зависимостям (10) и (11) $S_1 = 50$ м, $t_1 = 32$ с.

Второй этап. По формулам (15) и (13) $n = 0,83$, $M_d = 29\ 400$ т; по (26) $A = -70$ кН, $B = -0,45$ м/с, $C = 294$ т/м (при $l_{3,T} = 50$ м); по (27) и (20) $v_2 = 1,40$ м/с, $t_2 = 34$ с, $S_2 = l_{3,T} = 50$ м.

Третий этап. По формулам (28) и (31) $P_3 = 171,5$ кН, $K_3 = 0,493$; по (29) и (30) $t_3 = 75$ с, $S_3 = 89$ м.

Четвертый этап. По формулам (39) и (13) $\bar{n} = 3,45$, $M_d = 71\ 480$ т; по (35) и (38) $t_4 = 650$ с, $S_4 = 467$ м.

Пятый этап. Приняв $l_{3,c} = S_5 = 25$ м, по формуле (42) получим $t_5 = 167$ с.

Полный путь торможения $S = 681$ м, время торможения $t = 958$ с ≈ 16 мин.

Анализ показывает, что расчет по формуле (39) приводит к увеличению массы плота в 4,5 раза, что физически трудно объяснимо, а тормозной путь и время на четвертом этапе сомнительно велики. Эту формулу целесообразно уточнить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов, А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение [Текст]: монография / А.А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 492 с.

2. Харитонов, В.Я. Новая технология плотового лесосплава на базе единого транспортного пакета на р.Пинеге [Текст] / В.Я. Харитонов, С.В. Посыпанов, Л.Н. Зунин // Наука – северному региону: сб. науч. тр. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – Вып. 60. – С. 345–351.

3. Харитонов, В.Я. Остановка плотов на течении [Текст]: учеб. пособие / В.Я. Харитонов, В.А. Пустошный. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. – 42 с.

4. Харитонов, В.Я. Экологически щадящая технология остановки плотов якорями новой конструкции [Текст] / В.Я. Харитонов, А.А. Солодков // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2006. – Вып. 64. – С. 219–222.

5. Чекалкин, К.А. Гидродинамические основы проектирования агрегатов для остановки плотов [Текст]: учеб. пособие / К.А. Чекалкин, Л.В. Мельников. – Л., 1987. – 64 с.

Поступила 18.10.07

V.Ya. Kharitonov
Arkhangelsk State Technical University

Inertial Characteristics of Rafts Stopped by Anchors

Calculation method of raft inertial characteristics when controlling its movement and stopping it with low blade swing and mass is offered.

Keywords: timber floating, raft, anchor, braking force, braking distance, speed, stage life.
