

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*378.33

М.М. ОВЧИННИКОВ, В.И. МИХАСЕНКО

С.-Петербургская лесотехническая академия



Овчинников Михаил Михайлович родился в 1930 г., окончил в 1954 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики С.-Петербургской лесотехнической академии, академик РАЕН. Имеет более 80 печатных работ в области совершенствования технологии водного транспорта леса, разработки перспективных экологически безопасных технологических схем водного транспорта леса на базе лесотранспортных и гидротехнических модулей, гидродинамики плотового лесосплава, расчета лесосплавных 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 20 печатных работ по вопросам использования математических методов в решении задач неустановившегося движения пучковых сортиментных и хлыстовых плотов.

**СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВЫХ ПЛОТОВ***

Проанализированы различные методики расчета основных параметров остановки пучковых плотов, основанные на интегрировании уравнения их движения с учетом присоединенной массы. Приведен пример расчета пути и времени остановки типового сортиментного плота. Показано, что наиболее надежные результаты дает методика СПб ЛТА.

* В порядке обсуждения.

Various methods of calculating the main parameters of bundle rafts have been analysed, based on integrating the equation of their motion with regard to associated mass. The example is given on calculating the way length and stopping time for the standard cut-to-length raft. The method elaborated at St.-Petersburg Forest Technical Academy is shown to produce the most reliable results.

Остановка плотов – наиболее сложная заключительная операция их буксировки. Данные об инерционных характеристиках плотов позволяют более обоснованно выбрать устройство для их торможения, а также разработать диспетчерские графики плотового лесосплава.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ методов расчета пути и длительности остановки пучковых плотов, предложенных В.А. Щербаковым [6], А.А. Митрофановым [1], К.А. Чекалкиным и Л.В. Мельниковым [5], М.М. Овчинниковым [2–4]. Все анализируемые методы базируются на использовании дифференциального уравнения движения плота, устанавливающего зависимость изменения его скорости от массы и сил, действующих на плот на этапах разгона и торможения. Это уравнение имеет вид

$$M_d \frac{dv}{dt} = \mp rv^2 - P_T + im_{др}g \pm P_B, \quad (1)$$

где M_d – действующая масса плота, складывающаяся из массы лесоматериалов, находящихся в плоте $m_{др}$, кг, и присоединенной массы $m_{пр}$, характеризующей инерцию жидкости, вовлекаемой плотом в совместное движение при его неравномерном движении;

v – скорость движения плота относительно воды, м/с, $v = v_{техн} - v_{теч}$ ($v_{техн}$ – скорость плота относительно берега, $v_{теч}$ – скорость течения);

rv^2 – гидродинамическая сила, действующая на плот на этапах торможения, когда скорость движения плота относительно воды v уменьшается от начального значения v_0 до нуля, и разгона, когда скорость плота v увеличивается от нуля до скорости течения $v_{теч}$, Н; в первом случае в уравнении (1) берется знак минус, во втором – плюс; r – приведенное сопротивление плота:

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

C_R – коэффициент гидродинамического сопротивления плота;

ρ – плотность воды, кг/м³;

B, T – соответственно ширина и средняя осадка плота, м;

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

$im_{др}g$ – составляющая силы тяжести плота на направление его движения, Н (i – уклон свободной поверхности);

P_B – сила воздействия ветра на плот, Н.

Достоверность методики расчета инерционных характеристик плотов определяется обоснованным учетом присоединенной массы плота $m_{пр}$. Различие в анализируемых методиках расчета состоит в разном способе ее оценки и определении гидродинамического сопротивления плота.

Наиболее просто вопрос о присоединенной массе плота решается в работе В.А. Щербакова [6], который считает, что $m_{пр}$ постоянна как на этапе разгона, так и торможения. Выражая присоединенную массу плота $m_{пр}$ в долях от массы лесоматериалов в нем $m_{др}$, В.А. Щербаков рекомендует экспериментальную зависимость

$$M_d = m_{др} + m_{пр} = (1,5 \dots 1,7) m_{др}. \quad (3)$$

Полагая, что присоединенная масса незначительна в действующей массе плота, В.А. Щербаков предлагает формулу

$$M_d = 0,84 \rho LBT, \quad (4)$$

где L – длина плота, м.

Учитывая, что плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, формулу (4) записываем в виде

$$M_d = 840LBT. \quad (5)$$

Для сортиментного плота с габаритами $460 \times 54 \times 1,68 \text{ м}$, объемом $V_{др} = 25,6 \text{ тыс.м}^3$ и коэффициентом полнодревесности $K = 0,614$ получены частные результаты:

$$m_{пр} = 0,562 m_{др}; \quad M_d = 1,562 m_{др}.$$

Согласно [5] масса лесоматериалов в плоте

$$m_{др} = 1,12 \rho_{др} V_{др} = 1,12 \rho_{др} kLBT. \quad (6)$$

В работах [1–3, 5] обоснованно указывается, что присоединенная масса плота не может быть одинаковой на этапах разгона и торможения из-за различного характера обтекания плота частицами воды на этих этапах.

Согласно методике расчета, изложенной в работах [1, 5], присоединенная масса плота зависит не только от его геометрических размеров, но и от скорости движения относительно воды. На основании поставленных экспериментов были получены следующие соотношения для сортиментных плотов:

$$M_d = m_{др} (1 + n). \quad (7)$$

Коэффициент n принимают:

на этапе торможения

$$n = \tilde{n} = -0,137 + 0,413C + 27,164 e^{-4,605C}; \quad (8)$$

на этапе разгона

$$n = n_1 + n_2 \frac{v}{v_{теч}}, \quad (9)$$

где $n_1 = 0,469C - 0,369$;

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

$$C = \frac{B}{\sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{др}}}{\rho} LBT}} \quad (10)$$

Из этих зависимостей следует, что действующая и присоединенная массы плота на этапе торможения – величины постоянные.

Более поздние исследования, проведенные в Ленинградской лесотехнической академии [2–4], показали, что на значение присоединенной массы плота влияют его структурные параметры (качество сплотки пучков, характеризующее коэффициентом полндревесности, неравномерности их осадок, зазоры между пучками, формы выступов и т. д.), сила, приложенная к плоту в процессе его остановки, и скорость течения. Эти исследования подтвердили положение о постоянстве присоединенной массы на этапе торможения плота. На этапе разгона она зависит от безразмерных сил $\bar{P}_p = P/rv_{\text{теч}}^2$, где P – сила, приложенная к плоту в процессе его остановки с учетом воздействия силы ветра P_v и составляющей силы тяжести плота на направление его движения $im_{\text{др}}g$.

По методике ЛТА в расчетные формулы для определения пути, времени разгона и торможения плота входят величины ω_t , ω_p , Ω_t и Ω_p , характеризующие присоединенную массу плота на этапах торможения и разгона (см. формулы (17), (20), (23), (26)).

Было установлено, что на этапе торможения величины ω_t , Ω_t постоянны и зависят только от структурных параметров плота. Для плотов, принадлежащих одному классу и формируемых по стандартной технологии (хлыстовые и сортиментные плоты), величины ω_t и Ω_t одинаковы. В частности, при диапазоне изменения плотности лесоматериалов $\rho_{\text{др}} = 800 \dots 850$ кг/м³ было получено: для хлыстовых плотов с коэффициентом полндревесности $k = 0,365 \dots 0,387$ $\omega_t = 0,24$ и $\Omega_t = 0,31$; для сортиментных плотов с $k = 0,448 \dots 0,475$ $\omega_t = 0,17$ и $\Omega_t = 0,24$.

На этапе разгона ω_p и Ω_p зависят не только от структуры плота, но и от силы, приложенной к плоту, а также от скорости течения. Эти зависимости были установлены на основании модельных и натурных испытаний сортиментных и хлыстовых плотов и представлены в работах [2, 3] в виде графиков $\omega_p = f(P/rv_{\text{теч}}^2)$ и $\Omega_p = F(P/rv_{\text{теч}}^2)$ отдельно для каждого класса плотов. В дальнейшем эти зависимости были аппроксимированы формулами [4]:

для сортиментных плотов

$$\omega_p = 0,240 + 3,791e^{1,615 \ln(\bar{P}_p - 1) - 3,875(\bar{P}_p - 1)}, \quad (11)$$

$$\Omega_p = 0,240 + 0,741e^{0,602 \ln(\bar{P}_p - 1) - 1,096(\bar{P}_p - 1)}, \quad (12)$$

для хлыстовых плотов

$$\omega_p = 0,310 + 3,791e^{1,615 \ln(\bar{P}_p - 1) - 3,875(\bar{P}_p - 1)}, \quad (13)$$

$$\Omega_p = 0,310 + 0,741e^{0,602 \ln(\bar{P}_p - 1) - 1,096(\bar{P}_p - 1)}. \quad (14)$$

Авторам статьи не представилось возможным непосредственно использовать формулы для определения пути и времени движения плота на этапах разгона и торможения, которые приведены в работах [1, 5, 6], из-за

различного подхода к выводу и обоснованию этих расчетных зависимостей. Поэтому для анализа предложенных методик расчета основных параметров плота в процессе его остановки необходимые расчетные соотношения нами были получены непосредственным интегрированием уравнения плота (1) при одновременном использовании рекомендаций других авторов по оценке присоединенной массы плота. Эти соотношения представлены ниже в унифицированной форме, удобной для сравнительного расчета и анализа. После введения единых обозначений расчетные формулы приобретают вид:

1) на этапе торможения для времени t_τ и пути l_τ торможения плота относительно воды:

$$t_\tau = \frac{M_d}{\sqrt{rP}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{r}{P}} v_0; \quad (15)$$

$$t_\tau = \frac{m_{dp}(1+\bar{n})}{\sqrt{rP}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{r}{P}} v_0; \quad (16)$$

$$t_\tau = \frac{m_{dp} + \omega_\tau \rho LBT}{\sqrt{rP}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{r}{P}} v_0; \quad (17)$$

$$l_\tau = \frac{M_d}{2r} \ln\left(1 + \frac{rv_0^2}{P}\right); \quad (18)$$

$$l_\tau = \frac{m_{dp}(1+\bar{n})}{2r} \ln\left(1 + \frac{rv_0^2}{P}\right); \quad (19)$$

$$l_\tau = \frac{m_{dp} + \Omega_\tau \rho LBT}{2r} \ln\left(1 + \frac{rv_0^2}{P}\right); \quad (20)$$

2) на этапе разгона для времени t_p и пути l_p разгона плота относительно воды

$$t_p = \frac{M_d}{2\sqrt{rP}} \ln \frac{(\sqrt{P} + \sqrt{r} v_{\text{теч}})}{(\sqrt{P} - \sqrt{r} v_{\text{теч}})}; \quad (21)$$

$$t_p = \frac{m_{dp}(1+n_1)}{2\sqrt{rP}} \ln \frac{(\sqrt{P} + \sqrt{r} v_{\text{теч}})}{(\sqrt{P} - \sqrt{r} v_{\text{теч}})} - \frac{m_{dp}n_2}{2v_{\text{теч}}r} \ln\left(1 - \frac{rv_{\text{теч}}^2}{P}\right); \quad (22)$$

$$t_p = \frac{m_{dp} + \omega_p \rho LBT}{2\sqrt{rP}} \ln \frac{(\sqrt{P} + \sqrt{r} v_{\text{теч}})}{(\sqrt{P} - \sqrt{r} v_{\text{теч}})}; \quad (23)$$

$$l_p = \frac{M_d}{2r} \ln\left(1 - \frac{rv_{\text{теч}}^2}{P}\right); \quad (24)$$

$$l_p = \frac{m_{dp}(1+n_1)}{2r} \ln\left(1 - \frac{rv_{\text{теч}}^2}{P}\right) + \frac{m_{dp}n_2}{r} - \frac{m_{dp}n_2}{2v_{\text{теч}}r} \sqrt{\frac{P}{r}} \ln \frac{(\sqrt{P} + \sqrt{r} v_{\text{теч}})}{(\sqrt{P} - \sqrt{r} v_{\text{теч}})}; \quad (25)$$

$$l_p = \frac{m_{dp} + \Omega_p \rho LBT}{2r} \ln\left(1 - \frac{rv_{\text{теч}}^2}{P}\right). \quad (26)$$

Формулы (15), (18), (21) и (24) получены по результатам исследований В.А. Щербакова (ЦНИИЛесосплава), зависимости (16), (19), (22) и (25) – по данным К. А. Чекалкина, А. А. Митрофанова и Л. В. Мельникова (АЛТИ), формулы (17), (20), (23), (26) – по методике расчета М. М. Овчинникова (ЛТА).

Для унификации этих формул факторы, отличающие одну методику расчета от другой, представлены в виде дополнительных слагаемых и множителей в одинаковых по смыслу выражениях.

Расчеты, выполненные по зависимостям АЛТИ (22), (25), дали заметно завышенные результаты по сравнению с расчетами по формулам (23), (26). Выражения для времени t_p и пути разгона l'_p плота относительно берега (в форме, аналогичной представленной в методике АЛТИ [5]) имеют вид

$$t_p = \frac{m_{др}}{2rv_{теч}} \left(n_2 \ln \frac{\bar{P}_p}{\bar{P}_p - 1} + \frac{1+n_1}{\sqrt{\bar{P}_p}} \ln \frac{\sqrt{\bar{P}_p} + 1}{\sqrt{\bar{P}_p - 1}} \right); \quad (27)$$

$$l'_p = \frac{m_{др}}{2r\sqrt{\bar{P}_p}} \left\{ 2n_2\sqrt{\bar{P}_p} - [(1+n_1)\sqrt{\bar{P}_p} - n_2\sqrt{\bar{P}_p}] \ln \frac{\bar{P}_p}{\bar{P}_p - 1} + (1+n_1 - n_2\sqrt{\bar{P}_p}) \ln \frac{\sqrt{\bar{P}_p} + 1}{\sqrt{\bar{P}_p - 1}} \right\}. \quad (28)$$

В то же время авторы работы [5] представляют без объяснений и вывода аналогичные формулы, дающие более точные результаты по сравнению с экспериментом:

$$t_p = \frac{m_{др}}{2rv_{теч}\sqrt{\bar{P}_p}} \left(n_2 \ln \frac{\bar{P}_p}{\bar{P}_p - 1} + (1+n_1) \ln \frac{\sqrt{\bar{P}_p} + 1}{\sqrt{\bar{P}_p - 1}} \right); \quad (29)$$

$$l'_p = \frac{m_{др}}{2r\sqrt{\bar{P}_p}} \left\{ 2n_2 - [(1+n_1)\sqrt{\bar{P}_p} - n_2] \ln \frac{\bar{P}_p}{\bar{P}_p - 1} + (1+n_1 - n_2\sqrt{\bar{P}_p}) \ln \frac{\sqrt{\bar{P}_p} + 1}{\sqrt{\bar{P}_p - 1}} \right\}. \quad (30)$$

Исследование зависимостей (29), (30) на основе унифицированных результатов интегрирования дифференциального уравнения движения плота (1) показало, что эти формулы справедливы лишь при условии, что коэффициент n , характеризующий присоединенную массу плота в методике АЛТИ, определяется по формуле

$$n = n_1 + \frac{n_2}{\sqrt{\bar{P}_p}} \frac{v}{v_{теч}} = n_1 + n_2 \sqrt{\frac{r}{P}} v, \quad (31)$$

а не по зависимости (9), как утверждают авторы [5].

Следовательно, на этапе разгона присоединенная масса плота в методике АЛТИ также зависит от безразмерной силы $\bar{P}_p = P/\rho v^2_{теч}$. Качественно зависимость (31) имеет такой же характер, как и в методике ЛТА при $\bar{P}_p \geq 1,4 \dots 1,5$.

Тогда с учетом формулы (31) выражения (22) и (25) приобретают следующий вид:

$$t_p = \frac{m_{др}(1+n_1)}{2\sqrt{rP}} \ln \left(\frac{\sqrt{P} + \sqrt{r} v_{теч}}{\sqrt{P} - \sqrt{r} v_{теч}} \right) - \frac{m_{др}n_2}{2\sqrt{rP}} \ln \left(1 - \frac{rv_{теч}^2}{P} \right); \quad (32)$$

$$l_p = \frac{m_{др}(1+n_1)}{2r} \ln \left(1 - \frac{rv_{теч}^2}{P} \right) + \frac{m_{др}n_2 v_{теч}}{\sqrt{rP}} - \frac{m_{др}n_2}{2r} \ln \left(\frac{\sqrt{P} + \sqrt{r} v_{теч}}{\sqrt{P} - \sqrt{r} v_{теч}} \right). \quad (33)$$

В дальнейшем при сопоставительных расчетах мы использовали уточненные формулы (32), (33) вместо (22), (25).

По приведенным формулам рассчитаны остановки сортиментного плота при буксировке в Волжско-Камском бассейне по глубокой спокойной воде на длинном буксирном канате. Тормозная сила постоянна (222,264 кН), скорость буксировки относительно воды 0,5 м/с, скорость течения 1,0 м/с. Расчеты выполнены для плота объемом 22 356 м³ с габаритами $B = 54$ м, $L = 460$ м, $T = 2,0$ м, коэффициентом полнодревесности 0,45 и плотностью лесоматериалов 850 кг/м³. Получены следующие результаты:

Автор методики	$t_{ост}, с$	$l_{ост}, м$
В.А. Щербаков	405,7	225,2
ЛТА	348,0	164,5
АЛТИ	385,4	179,5

Из этих данных следует, что формулы В.А. Щербакова, К.А. Чекалкина и других авторов дают завышенные результаты по сравнению с методикой ЛТА для времени на 10...16, для пути на 9...35 %. Это объясняется различными подходами к оценке присоединенной массы плота в процессе его разгона и торможения, а также точностью проведения экспериментов отдельными исследователями. Но поскольку методика ЛТА базируется на результатах широко поставленных натуральных испытаний плотов, то ей следует отдать предпочтение.

Результаты систематических расчетов остановки пучковых плотов для разных лесосплавных бассейнов России и анализ полученных данных будут представлены в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Митрофанов А.А. Некоторые уточнения к расчету инерционных свойств плотов // Лесн. журн. - 1973. - № 5. - С. 47-51. - (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Овчинников М.М. Решение задачи по остановке плотов постоянной силой // Механизация рейдовых и лесоскладских работ: Сб. тр. / ЦНИИЛесосплава. - М., 1984. - С. 79-88. [3]. Овчинников М.М. Транспортные характеристики пучковых плотов: Учеб. пособие. - Л.: ЛТА, 1985. - 80 с. [4]. Овчинников М.М., Пятакин В.И., Михасенко В.И. Инерционные характеристики пучковых плотов // Лесозэксплуатация: Межвуз. сб. - Красноярск, 1995. - С. 131-139. [5]. Чекалкин К.А., Мельников Л.В. Гидродинамические основы проектирования агрегатов для остановки плотов: Учеб. пособие. - Л.: ЛТА, 1987. - 64 с. [6]. Щербаков В.А. Лесосплавные рейды. - М.: Лесн. пром-сть, 1979. - 248 с.