



УДК 630\*387.33

***А.А. Митрофанов***

Митрофанов Александр Александрович родился в 1941 г., окончил в 1964 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета, академик РАЕН. Имеет более 190 печатных работ в области гидродинамики взаимодействия плохообтекаемых тел с жидкостью, механики грунтов, научного обоснования и разработки новых экологически защищенных технологий водного транспорта леса по рекам с недостаточными глубинами.



### **О ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТОВ ПО РАЗНЫМ МЕТОДИКАМ\***

Рассмотрены разные методики расчета инерционных характеристик плотов. Выполнены и проанализированы сравнительные расчеты.

*Ключевые слова:* нестационарность, масса, поток, скорость, сопротивление, торможение, разгон, остановка.

В работе [6], опубликованной в порядке обсуждения, сделана попытка доказать, что наиболее надежная методика расчета инерционных характеристик плотов разработана автором статьи М.М. Овчинниковым. Анализ представленных в этой статье материалов и первоисточников, в которых изложены результаты исследований В.А. Щербакова [10], и наши разработки [3, 4] позволяют усомниться в правильности сделанных выводов.

Следует отметить, что при сравнительном анализе авторы пользовались не первоисточниками, в которых изложена наша методика, например [3] (хотя последняя приведена в списке литературы к статье [6]), а работой [9] других авторов, которые применили наши исследования для решения задачи разработки средств остановки плотов, к сожалению, с ошибками. В результате и в обсуждаемой статье [6] эти расчетные зависимости приведены с ошибками (формулы (9), (16), (19), (22), (25), (27), (28)). К сожалению, также с ошибками авторы статьи [6] привели и свои расчетные формулы (20), (26), что вызвало неточности при анализе материалов наших исследований [4].

---

\* Работа выполнена по гранту № ТО2 – 11.2 – 1183 Министерства образования РФ и публикуется в порядке обсуждения проблемы.

Исследования В.А. Щербакова [10] сыграли большую роль в изучении рассматриваемого вопроса, но они базируются на недостаточном экспериментальном материале и поэтому не претендуют на высокую точность результатов. Тем не менее мы своевременно, обосновав свои выводы [3], сделали сравнительный анализ с данными В.А. Щербакова [10]. К сожалению, авторы статьи [6] в своих выводах [5] не проанализировали наших результатов [3] и, более того, не привели ни одной ссылки на наши работы, чем, естественно, ввели в заблуждение научную общественность по сути данной проблемы. Не вдаваясь в дальнейшую полемику, считаем необходимым, в частности и в связи с публикацией статьи [6], выполнить такой анализ.

Поскольку в работах [6, 10] рассмотрен один случай неустановившегося движения плотов – торможение в речном потоке постоянной силой, обратимся именно к нему. Более широкий круг возможных ситуаций неустановившегося движения плотов рассмотрен нами в работе [4].

Дифференциальное уравнение торможения плота в речном потоке постоянной силой имеет вид

$$M_d = \frac{dV}{dt} + M_b \frac{dV}{dt} = -\lambda \frac{dV}{dt} \pm R \pm \Delta R_{\text{нест}} + R_i \pm R_b - F, \quad (1)$$

где  $M_d$  – масса древесины плота;

$M_b$  – масса воды в пустотах плота, участвующая в движении;

$\lambda$  – присоединенная масса плота;

$\frac{dV}{dt}$  – ускорение движения плота, где  $V$  – техническая скорость,

$t$  – время движения плота;

$R$  – сопротивление воды равномерному движению плота;

$\Delta R_{\text{нест}}$  – дополнительное сопротивление, вызываемое нестационарностью движения;

$R_i, R_b$  – силы влечения плота от уклона и ветра;

$F$  – сила торможения плота.

Подробное обоснование структуры уравнения (1), имеющее принципиальное значение для понимания физической сути рассматриваемого процесса, сделано нами в работах [3, 4] и здесь, для сокращения выкладок, не приводится. Отметим только, что при обработке результатов экспериментальных исследований все параметры, включая  $M_b$ ,  $\lambda$  и  $\Delta R_{\text{нест}}$ , были определены количественно и оценены качественно.

Учитывая большую сложность решения уравнения (1) при учете  $M_b$ ,  $\lambda$  и  $\Delta R_{\text{нест}}$  в чистом виде, мы, без потери точности расчета инерционных характеристик, объединили их в общий коэффициент  $n$ :

$$n = \frac{\lambda + M_b \pm \Delta R_{\text{нест}}}{M_d} \cdot \frac{dV}{dt}. \quad (2)$$

В результате дифференциальное уравнение (1) принимает вид

$$M_d (1 + n) \frac{dV}{dt} = \pm R + R_i \pm R_b - F. \quad (3)$$

Расчетные зависимости для определения  $n$  были получены нами экспериментальным путем на моделях и проверены в натуральных условиях. Для случая торможения плота относительно речного потока значения  $n$  приняты постоянными –  $\tilde{n}$ . Их находят по формуле

$$\tilde{n} = -0,137 + 0,413 \frac{B_n}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_n L_n T_n}} + 27,164 \exp\left(-\frac{4,605 B_n}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_n L_n T_n}}\right), \quad (4)$$

где  $B_n$ ,  $L_n$ ,  $T_n$  – ширина, длина и осадка плота;

$\rho_d$ ,  $\rho$  – плотность древесины и воды.

Для случая разгона плота относительно речного потока коэффициент  $n$  является переменной величиной и определяется по формуле

$$n = n_1 + n_2 \frac{V_n - V}{V_p}, \quad (5)$$

$$\text{где } n_1 = 0,469 \frac{B_n}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_n L_n T_n}} - 0,369; \quad (6)$$

$$n_2 = 0,564 \frac{B_n}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_n L_n T_n}} + 0,648; \quad (7)$$

$V_n$  – скорость речного потока;

$V_p$  – условная скорость равномерного движения, которую теоретически может достичь плот в конце разгона под действием постоянной внешней силы,

$$V_p = \sqrt{\frac{F - R_i \pm R_b}{r}}. \quad (8)$$

Здесь  $r$  – приведенное сопротивление воды равномерному движению плота, определяемое из выражения

$$R = rV_0^2, \quad (9)$$

где  $V_0$  – скорость движения плота относительно речного потока.

Полученные нами экспериментальные значения  $r$  для пучковых сортиментных плотов [4] хорошо совпадают с результатами, вычисленными по формулам В.Н. Худогова [8] и формуле ЦНИИЛесосплава [1], имеющей вид

$$R = rV_0^2 = [50 B_n T_n + 0,3 L_n (B_n + 2T_n)]gV_0^2, \quad (10)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Данное обстоятельство дает в первом приближении основание рекомендовать эти формулы для определения  $r$  при расчетах остановки плотов, когда нет влияния движителя и ограниченности потока.

Зависимости, рекомендуемые М.М. Овчинниковым [5], дают существенно завышенные значения  $r$  по сравнению с определенными по формуле (10) и практически совпадающие с результатами вычислений по формуле ЦНИИЛесосплава, приведенной в работах [2, 7] и имеющей вид

$$R = [\xi 0,84 B_n T_n + 0,009 L_n (B_n + 2T_n)] \frac{\rho}{2} V_0^2 = rV^2, \quad (11)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления, зависящий от отношения  $B_n/T_n$ .

Факт завышения результатов определения величины  $r$  по формуле (11) можно, по-видимому, объяснить тем, что она учитывает влияние движителя буксировщика и ограниченность потока жидкости и предназначена, следовательно, для транспортных расчетов. Этот вывод подтверждается и данными справочника [1].

В своей работе мы не делаем окончательных выводов о методике определения величины  $r$ , так как такая цель не ставилась при выполнении исследований. Данная проблема является темой отдельной полемики. В дальнейших расчетах, чтобы обеспечить единый подход, при определении  $r$  для плотов мы применили методику М.М. Овчинникова [5], так как результаты вычислений по ней хорошо согласуются с данными, полученными по формуле (11), а последняя в лесосплавной науке [7] принята за основную для транспортных расчетов.

С учетом сделанных пояснений дифференциальные уравнения торможения плота в речном потоке на первом и втором этапах остановки по нашей методике принимают вид:

$$M_d (1 + \tilde{n}) \frac{dV}{dt} = -r(V - V_n)^2 - R_\Sigma; \quad (12)$$

$$M_d (1 + n_1 + n_2(V_n - V) \sqrt{\frac{r}{R_\Sigma}}) \frac{dV}{dt} = r(V_n - V)^2 - R_\Sigma, \quad (13)$$

где

$$R_\Sigma = F - R_i \pm R_b. \quad (14)$$

По методике В.А. Щербакова [10], аналогичные уравнения, при наших обозначениях, имеют вид:

$$M_n \frac{dV}{dt} = -r(V - V_n)^2 - R_\Sigma; \quad (15)$$

$$M_n \frac{dV}{dt} = r(V_n - V)^2 - R_\Sigma, \quad (16)$$

где  $M_n$  – действующая масса плота, по рекомендациям В.А. Щербакова,  $M_n = 0,84 \rho L_n B_n T_n$ .

М.М. Овчинников также принимает действующую массу плота на обоих этапах остановки постоянной [5] и рекомендует находить ее по формулам:

на первом этапе

$$M_{\text{п}} = M_{\text{д}} + 0,24\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}; \quad (17)$$

на втором этапе

$$M_{\text{п}} = M_{\text{д}} + \Omega \rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}, \quad (18)$$

где  $\Omega$  – постоянный коэффициент, определяется по графикам работы [5] в зависимости от коэффициента запаса тормозной силы  $k$ ,

$$k = \frac{F - R_i \pm R_{\text{в}}}{rV_{\text{п}}^2}. \quad (19)$$

Все приведенные дифференциальные уравнения решаются в элементарных функциях.

Так как из инерционных характеристик плота важнейшей является путь торможения, то для сравнительного анализа приводим в наших обозначениях расчетные формулы для определения пути торможения на первом и втором этапах: по нашей методике –  $S_1, S_2$ ; по методике В.А. Щербакова –  $S'_1, S'_2$ , по М.М. Овчинникову –  $S''_1, S''_2$ :

$$S_1 = \frac{M_{\text{д}}(1 + \tilde{n})}{2r} \left[ \ln \left( 1 + \frac{(m-1)^2}{k} \right) + \frac{2}{\sqrt{k}} \operatorname{arctg} \frac{m-1}{\sqrt{k}} \right]; \quad (20)$$

$$S_2 = \frac{M_{\text{д}}}{2r\sqrt{k}} \left[ -2n_2 - ((1 + n_1)\sqrt{k} - n_2) \ln \frac{k}{k-1} + (1 + n_1 - n_2\sqrt{k}) \ln \frac{\sqrt{k} + 1}{\sqrt{k} - 1} \right]; \quad (21)$$

$$S'_1 = \frac{0,84\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}}{2r} \left[ \ln \left( 1 + \frac{(m-1)^2}{k} \right) + \frac{2}{\sqrt{k}} \operatorname{arctg} \frac{m-1}{\sqrt{k}} \right]; \quad (22)$$

$$S'_2 = \frac{0,84\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}}{2r} \left( \frac{1}{\sqrt{k}} \ln \frac{\sqrt{k} + 1}{\sqrt{k} - 1} - \ln \frac{k}{k-1} \right); \quad (23)$$

$$S''_1 = \frac{M_{\text{д}} + 0,24\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}}{2r} \ln \left( 1 + \frac{(m-1)^2}{k} \right) + \frac{M_{\text{д}} + 0,17\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}}{r\sqrt{k}} \operatorname{arctg} \frac{m-1}{\sqrt{k}}; \quad (24)$$

$$S''_2 = \frac{M_{\text{д}} + \Omega\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}}{2r} \ln \frac{k-1}{k} + \frac{M_{\text{д}} + \omega\rho L_{\text{п}} B_{\text{п}} T_{\text{п}}}{2r\sqrt{k}} \ln \frac{\sqrt{k} + 1}{\sqrt{k} - 1}, \quad (25)$$

где  $\omega$  – коэффициент, определяемый по [5].

В формулах (20)–(25)  $m = \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{п}}}$  ( $V_{\text{н}}$  – техническая скорость плота, при которой включаются в работу тормозные средства).

Результаты вычисления пути плота по разным методикам для трех плотов с параметрами, приведенными в табл. 1, даны в табл. 2–4.

При расчетах принято  $m = 1,4$ ;  $V_{п} = 1,0$  м/с, коэффициент  $r$  определен по формулам М.М. Овчинникова [5]. Масса плотов найдена по выражению  $M_{д} = \rho_{д}\eta B_{п}L_{п}T_{п}$ , где  $\rho_{д} = 860$  кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент полндревесности  $\eta$  (по рекомендациям [7]) для плотов № 1, 3 принят равным 0,45, для плота № 2 – 0,42.

Проанализируем результаты вычисления значений инерционных характеристик плотов по разным методикам (табл. 2–4). Вначале рассмотрим

Таблица 1

## Параметры плотов

Номер плота	Размер плота, м			$M_{д} \cdot 10^{-7}$ , кг	$r \cdot 10^{-5}$ , Н · с <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>	$\tilde{n}$	$n_1$	$n_2$
	$L_{п}$	$B_{п}$	$T_{п}$					
1	415	80	1,6	2,058	2,327	0,788	0,680	1,946
2	460	54	1,6	1,436	1,656	0,563	0,411	1,586
3	650	33	1,6	1,328	1,231	0,503	0,132	1,250

Таблица 2

## Результаты вычислений пути торможения плотов по формулам (20), (21)

$k$	$S_1$ , м, для плотов			$S_2$ , м, для плотов		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
1,1	65,7	56,3	67,3	125,8	102,7	101,9
1,2	60,4	51,8	62,0	109,2	94,3	87,9
1,4	52,1	44,7	53,4	85,5	77,8	69,6
1,6	45,8	39,3	47,0	71,3	58,3	57,9
1,8	40,9	35,0	41,9	61,0	49,9	49,6

Таблица 3

## Результаты вычислений пути торможения плотов по формулам (22), (23)

$k$	$S'_1$ , м, для плотов			$S'_2$ , м, для плотов		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
1,1	79,6	83,7	97,2	111,7	117,5	136,4
1,2	73,3	77,1	89,5	98,6	98,1	120,4
1,4	63,2	66,4	77,2	80,7	84,8	98,5
1,6	55,6	58,4	67,8	68,6	72,1	83,8
1,8	49,6	52,1	60,5	59,8	62,9	73,0

Таблица 4

## Результаты вычислений пути торможения плотов по формулам (24), (25)

$k$	$S''_1$ , м, для плотов			$S''_2$ , м, для плотов		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
1,1	53,9	54,7	65,8	80,7	81,6	99,0
1,2	49,6	49,8	60,6	76,7	77,5	93,7
1,4	42,8	42,9	52,2	64,9	65,6	79,2
1,6	37,6	37,8	45,9	49,8	50,1	60,7
1,8	33,6	33,7	41,0	43,1	36,0	52,6

соотношение гидродинамических и инерционных характеристик для плотов разных размеров при неустановившихся режимах движения. Предположим условно, что масса плота в течение всего процесса неустановившегося движения, как это принято в работах [5, 6, 10], остается постоянной. Пусть у двух плотов одинаковы масса  $M_{п1} = M_{п2}$ , площадь в плане  $S_{п1} = S_{п2}$  и осадка  $T_{п1} = T_{п2}$ . Для этих плотов могут быть разными соотношения  $B_{п}/L_{п}$ . Примем  $\frac{B_{п1}}{L_{п1}} > \frac{B_{п2}}{L_{п2}}$ . Тогда  $r_1 > r_2$ , и, при одинаковых значениях коэффициента  $k$  (19) для остановки второго плота потребуется меньшее усилие, а путь его торможения будет больше.

Применительно к рассмотренным в настоящей работе плотам № 1, 2, 3

$$\frac{M_{п2}}{2r_2} < \frac{M_{п1}}{2r_2} < \frac{M_{п3}}{2r_3},$$

отсюда, при действующей в процессе торможения массе  $M = \text{const}$  получили путь торможения плота № 3 с небольшой массой больше, чем для плота № 1 со значительно большей массой (табл. 3, 4).

Проведенные нами на моделях и в натуральных условиях исследования гидродинамических и инерционных характеристик плотов показали, что действующая масса плота  $M_d(1+n)$  (3) не является постоянной. Коэффициент нестационарности  $n$  (2) зависит главным образом от дополнительного сопротивления  $\Delta R_{\text{нест}}$ , вызванного нестационарностью движения. Экспериментально установлено, что при торможении плота относительно воды это сопротивление уменьшает, а при разгоне увеличивает значение коэффициента  $n$ . Так как по своей природе  $\Delta R_{\text{нест}}$  является, преимущественно, сопротивлением формы, то оно зависит в основном от ширины плота. В то же время присоединенная масса  $\lambda$  и масса воды в пустотах плота  $M_v$  определяются через объем плота. Поэтому мы получили расчетные формулы (4)–(7) для определения значений коэффициента  $n$  в функции от параметра

$$\frac{B_{п}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_{п} L_{п} T_{п}}}, \text{ включающего ширину и объем плота.}$$

Для случая торможения плота коэффициент  $n$  принят, без потери точности, величиной постоянной  $\tilde{n}$  (4), для разгона – зависимой от относительной скорости движения плота (5). Полученные результаты подтверждены натурными исследованиями [4], при которых определяли не только инерционные характеристики плота (путь и время торможения и разгона), но и значение коэффициента нестационарности  $n$ .

Таким образом, при определении коэффициентов  $n$  по формулам (4)–(7) учитывается не только объем плота, как по другим методикам, но и его ширина, а через эти параметры и отношение  $B_{п}/L_{п}$ .

В работе М.М. Овчинникова [5] для случая разгона плота относительно речного потока коэффициенты  $\Omega$ ,  $\omega$  выражены в функции от коэффициента  $k$  (19) и не учитывают соотношения в размерах плота. В результате для каждого конкретного значения  $k$  и всех возможных размеров плотов величины  $\Omega$ ,  $\omega$  оказываются одинаковыми. Например, для двух конкретных плотов с одинаковым  $r$  и разным соотношением  $B_{п}/L_{п}$  значения  $\Omega$ ,  $\omega$  будут одинаковыми, что, как следует из сказанного, неверно. Естественно, данное обстоятельство отражается на точности определения инерционных характеристик плотов, особенно с малым соотношением  $B_{п}/L_{п}$  (табл. 2, 4).

Охарактеризованные в настоящей работе плоты № 1 и 2 в недалеком прошлом были основными соответственно для Северодвинского и Волжско-Камского бассейнов, плот № 3 буксировали в Ангаро-Енисейском бассейне. В настоящее время, в связи с ростом плотового сплава по боковым рекам и уменьшением ширины судового хода больших рек, вызванным снижением объемов дноуглубительных работ, наметилась тенденция к переходу на плоты с малым соотношением  $B_{п}/L_{п}$ . Поэтому точность расчета инерционных характеристик таких плотов становится в настоящее время особенно актуальной проблемой.

Выполненный анализ разных методик расчета, на наш взгляд, будет способствовать более объективному и ответственному подходу специалистов к вопросам планирования и проектирования плотового сплава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный транспорт леса: справочник. – М.: Гослесбумиздат, 1963. – 561 с.
2. Донской И.П. Водный транспорт леса / И.П. Донской, В.В. Савельев. – М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 286 с.
3. Митрофанов А.А. Некоторые уточнения к расчету инерционных свойств плотов / А.А. Митрофанов // Лесн. журн. – 1973. – № 5. – С. 47–51. – (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Митрофанов А.А. Научное обоснование и разработка экологически безопасного плотового лесосплава / А.А. Митрофанов. – Архангельск, 1999. – 267 с.
5. Овчинников М.М. Методические указания по транспортным расчетам буксировки пучковых плотов / М.М. Овчинников. – М., 1985. – 81 с.
6. Овчинников М.М. Сравнение различных методов расчета инерционных характеристик пучковых плотов / М.М. Овчинников, В.И. Михасенко // Лесн. журн. – 1998. – № 6. – С. 31–36. – (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Справочник по водному транспорту леса / В.А. Щербаков, Ю.П. Борисовец, В.Д. Александров [и др.]; под ред. В.А. Щербакова. – М., 1986. – 384 с.
8. Худогов В.Н. Гидродинамическое сопротивление плотов и внешней среды / В.Н. Худогов. – Красноярск, 1966. – 225 с.
9. Чекалкин К.А. Гидродинамические основы проектирования агрегатов для остановки плотов: учеб. пособие / К.А. Чекалкин, Л.В. Мельников. – Л.: ЛТА, 1987. – 64 с.

---

10. *Щербаков В.А.* Управление плотами при буксировке в речных условиях: технологич. информ. / В.А. Щербаков // ЦНИИЛесосплава. – Л., 1962. – № 134. – 35 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 07.05.04

*A.A. Mitrofanov*

**On Calculation Accuracy of Raft Inertial Characteristics Based  
on Different Methods**

Different methods of inertial characteristics calculation for rafts are analyzed. Comparative calculations have been carried out and analyzed.

---