



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;

λ – 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 , λ и $\Delta R_{\text{нест}}$, были определены количественно и оценены качественно.

Учитывая большую сложность решения уравнения (1) при учете M_b , λ 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;

ρ_d , ρ – плотность древесины и воды.

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

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

где $n_1 = 0,469 \frac{B_n}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_n L_n T_n}} - 0,369;$ (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. Худоногова [8] и формуле ЦНИИЛесосплава [1], имеющей вид

$$R = rV_0^2 = [50 B_n T_n + 0,3 L_n (B_n + 2T_n)] g V_0^2, \quad (10)$$

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 ξ – 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 Ω – 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 ω – 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/м³, а коэффициент полндревесности η (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 ² /м ²	\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 λ 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

$$\frac{B_{п}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_d}{\rho} B_{п} L_{п} T_{п}}},$$

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 Ω , ω 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 Ω , ω оказываются одинаковыми. Например, для двух конкретных плотов с одинаковым r и разным соотношением $B_{п}/L_{п}$ значения Ω , ω 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.
