

УДК 634.0.378.34

ОСТАНОВКА ПЛОТА НА ТЕЧЕНИИ**Суров Г.Я., Главатских Н.С., Штаборов Д.А.***ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
Архангельск, e-mail: g.y.surov@narfu.ru, n.glavatskih@narfu.ru, d.shtaborov@narfu.ru*

Остановка плотов при наличии течения, особенно в период весеннего половодья, является сложной и ответственной операцией. В настоящее время плоты на Северной Двине останавливают буксировщиком и трением о плотостоянку (берег, свайные кусты, боны, берегоукрепительную стенку). При наличии течения остановку осуществляют с разворотом плота на π рад. В практических условиях для организации безаварийной остановки плота необходимо знать продолжительность и путь торможения, потребность во вспомогательных судах, скорость подхода к плотостоянке, а также время начала прижима плота. В работе получены зависимости продолжительности t_1 и пути движения плота S_1 на первом этапе торможения от скорости движения плота v_1 до скорости течения v_p при условии, что после прекращения буксировки буксировщик сразу приступает к торможению. Получены зависимости продолжительности t_2 и пути торможения S_2 на втором этапе торможения от скорости течения v_p до скорости v , близкой к нулю, при которой возможно крепление плота на плотостоянке или до скорости v , равной нулю. Выражения получены при условии, что вспомогательные суда вступают в работу с начала второго этапа, т.е. при скорости движения плота, равной v_p . Полученные зависимости позволяют определить t_1, S_1, t_2, S_2 при условии вступления в работу вспомогательных судов как на первом, так и на втором этапах торможения.

Ключевые слова: силы влечения плота, силы трения, режим торможения, продолжительность и путь торможения, скорость подхода плота, буксировщик, вспомогательные суда

STOPPAGE OF A LOG RAFT IN A CURRENT**Surov G.Y., Glavatskikh N.S., Shtaborov D.A.***Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk,
e-mail: g.y.surov@narfu.ru, n.glavatskih@narfu.ru, d.shtaborov@narfu.ru*

Stoppage of a log rafts in a current, particularly – during a spring high flood, is a complicated operation. At present time, rafts at the Northern Dvina river are stopped by a tugboat and through friction along the elements of a water log storage area (land wall, poles, floating booms, pier). A floating raft has to be broached to π radian prior to its immobilization. In practical conditions, safe raft stoppage depends on a couple of factors: duration and distance of deceleration, number of needed auxiliary tugboats, velocity of raft's approach, moment of a stoppage operation start. The work describes dependencies of duration t_1 and distance S_1 of the first stage of a raft's deceleration from initial velocity v_1 to the velocity of river's current v_p . A tugboat is supposed to start restraining at the first moment of this stage. Dependencies of a deceleration duration t_2 and distance S_2 at the second stage of stoppage from the current velocity v_p to the velocity v close to zero are developed. Provided that the auxiliary tugboats commence their operation on the starting moment of stage 2, when a raft velocity is lowered to v_p . The dependencies worked out by the authors allow to determine values t_1, S_1, t_2 and S_2 taking into consideration the auxiliary boats' operations.

Keywords: drag force of a raft, friction force, conditions of deceleration, duration and distance of deceleration, velocity of a raft's approach, tugboat, auxiliary boats

На рейдах приплыва при постановке плотов на плотостоянку осуществляют их остановку. В настоящее время плоты на Северной Двине останавливают буксировщиком и трением о плотостоянку (берег, свайные кусты, боны, берегоукрепительную стенку). Остановка плотов при наличии течения, особенно в период весеннего половодья, является сложной и ответственной операцией. При наличии течения остановку осуществляют с разворотом плота на π рад. Работая против течения, буксировщик за счёт силы тяги на гаке тормозит плот и подводит его к плотостоянке. С речной стороны к борту плота ближе к буксировщику швартуются вспомогательные суда, которые, работая движителями, смещают плот поперёк потока и прижимают к плотостоянке (рис. 1).

При остановке силы влечения плота потоком, ветром, от уклона и инерцион-

ные силы уравниваются силой тяги буксировщика и силой трения плота о плотостоянку. По мере уменьшения скорости движения плота вниз по течению сила сопротивления воды движению переходит в силу влечения. Это происходит, когда скорость движения плота становится меньше скорости течения. Сила влечения плота потоком достигает наибольшей величины в момент полной его остановки [2, 3].

В практических условиях для организации безаварийной остановки плота необходимо знать продолжительность и путь торможения, потребность во вспомогательных судах, скорость подхода к плотостоянке, а также время начала прижима плота.

При работе буксировщика в режиме торможения и изменении скорости движения плота от v_1 , при которой буксировщик начинает работать в режиме торможения, до

скорости течения v_p (первый этап) дифференциальное уравнение имеет вид

$$M(1+n) \frac{dv}{dt} = -r(v-v_p)^2 \pm R_B + R_i - F_B, \quad (1)$$

где M – масса плота; n – коэффициент нестационарности, учитывающий массу воды в пустотах плота, присоединённую массу и дополнительное сопротивление, возникающее при неустановившемся движении [1, 4]; $\frac{dv}{dt}$ – ускорение движения плота; r – приведённое сопротивление воды движению плота; R_B – сила влечения плота ветром; R_i – сила влечения плота от уклона; F_B – сила тяги буксировщика

Обозначим

$$R = F_B - R_i \pm R_B. \quad (2)$$

Разделив переменные, получим выражение для продолжительности движения плота:

$$t = -M(1+n) \int \frac{dv}{r(v-v_p)^2 + R}. \quad (3)$$

$$t = M(1+n) \frac{1}{\sqrt{rR}} \left(\arctg \frac{r(v_1-v_p)}{\sqrt{rR}} - \arctg \frac{r(v-v_p)}{\sqrt{rR}} \right). \quad (6)$$

При $v = v_p$ получим продолжительность движения плота на первом этапе

$$t_1 = M(1+n) \frac{1}{\sqrt{rR}} \arctg \frac{r(v_1-v_p)}{\sqrt{rR}}. \quad (7)$$

Так как $\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dS}$, то выражение для пути движения плота имеет вид

$$S = -M(1+n) \int \frac{rdv}{r(v-v_p)^2 + R}. \quad (8)$$

Решение выражения (8)

$$S = -\frac{M(1+n)}{2r} \left(\ln \left| r(v-v_p)^2 + R \right| + \frac{2rv_p}{\sqrt{rR}} \arctg \frac{r(v-v_p)}{\sqrt{rR}} \right) + c. \quad (9)$$

При $v = v_1$, $S = 0$, тогда

$$c = \frac{M(1+n)}{2r} \left(\ln \left| r(v_1-v_p)^2 + R \right| + \frac{2rv_p}{\sqrt{rR}} \arctg \frac{r(v_1-v_p)}{\sqrt{rR}} \right). \quad (10)$$

Решение (9) с учётом (10) принимает вид

$$S = \frac{M(1+n)}{2r} \left(\ln \left| \frac{r(v_1-v_p)^2 + R}{r(v-v_p)^2 + R} \right| + \frac{2rv_p}{\sqrt{rR}} \left(\arctg \frac{r(v_1-v_p)}{\sqrt{rR}} - \arctg \frac{r(v-v_p)}{\sqrt{rR}} \right) \right). \quad (11)$$

При $v = v_p$ путь движения плота на первом этапе

$$S = \frac{M(1+n)}{2r} \left(\ln \left| \frac{r(v_1-v_p)^2}{R} + 1 \right| + \frac{2rv_p}{\sqrt{rR}} \arctg \frac{r(v_1-v_p)}{\sqrt{rR}} \right). \quad (12)$$

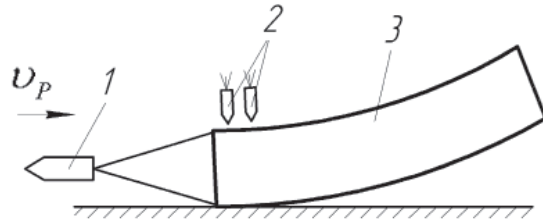


Рис. 1. Расчётная схема:

1 – буксировщик; 2 – вспомогательные суда; 3 – плот

Его решение при $F_B > R_i \pm R_B$ имеет вид

$$t = -M(1+n) \frac{1}{\sqrt{rR}} \arctg \frac{r(v-v_p)}{\sqrt{rR}} + c. \quad (4)$$

При $t = 0$ $v = v_1$, тогда

$$c = M(1+n) \frac{1}{\sqrt{rR}} \arctg \frac{r(v_1-v_p)}{\sqrt{rR}}. \quad (5)$$

С учётом (5) решение (4) примет вид

На втором этапе скорость движения плота снижается от скорости v_p до нуля, а относительно воды имеем разгон от скорости, равной нулю, до скорости, равной [5, 6]

$$v_2 = \sqrt{\frac{F_T \pm R_B - R_i}{r}} > v_p, \quad (13)$$

где F_T – сила торможения плота,

$$F_T = F_B + F_{TP}; \quad (14)$$

F_{TP} – сила трения плота о плотостоянку.

При разгоне плота по результатам экспериментальных исследований получена зависимость [4, 5]

$$n = n_1 + n_2 \frac{v}{v_2}. \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение движения плота на втором этапе торможения примет вид

$$M(1 + n_1 + n_2)(v_p - v) \sqrt{\frac{rd}{R_T}} \frac{v}{dt} = r(v_p - v)^2 - R_T, \quad (16)$$

где

$$R_T = F_T \pm R_B - R_i. \quad (17)$$

Разделив переменные, получим зависимость для времени движения плота

$$t = M \left(1 + n_1 + n_2 v_p \sqrt{\frac{r}{R_T}} \right) \int \frac{dv}{rv_p^2 - 2rv_p v + rv^2 - R_T} - Mn_2 \sqrt{\frac{r}{R_T}} \int \frac{v dv}{rv_p^2 - 2rv_p v + rv^2 - R_T}. \quad (18)$$

Учитывая, что

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dS}, \quad (19)$$

получим уравнение для пути движения плота:

$$S = M \left(1 + n_1 + n_2 v_p \sqrt{\frac{r}{R_T}} \right) \int \frac{v dv}{rv_p^2 - 2rv_p v + rv^2 - R_T} - Mn_2 \sqrt{\frac{r}{R_T}} \int \frac{v^2 dv}{rv_p^2 - 2rv_p v + rv^2 - R_T}. \quad (20)$$

При условии (направление ветра совпадает с направлением течения)

$$F_T > rv_p^2 + R_B + R_i \quad (21)$$

получаем решения уравнений (18) и (20) в общем виде

$$t = \frac{M}{2\sqrt{rR_T}} \left(-n_2 \ln |r(v_p - v)^2 - R_T| + (1 + n_1) \ln \left| \frac{r(v_p - v) - \sqrt{rR_T}}{r(v_p - v) + \sqrt{rR_T}} \right| \right) + c_1. \quad (22)$$

$$S = M \left(-\frac{2n_2 v}{\sqrt{4rR_T}} + \left(\frac{1 + n_1}{2r} - \frac{n_2 v_p}{\sqrt{4rR_T}} \right) \ln |r(v_p - v)^2 - R_T| + \right. \\ \left. + \left(\frac{v_p(1 + n_1)}{\sqrt{4rR_T}} - \frac{n_2}{2r} \right) \ln \left| \frac{2r(v_p - v) - \sqrt{4rR_T}}{2r(v_p - v) + \sqrt{4rR_T}} \right| \right) + c_2. \quad (23)$$

При подстановке в зависимости (22, 23) начальных условий $v = v_p, t = 0, S = 0$ получаем выражения для постоянных интегрирования:

$$c_1 = \frac{Mn_2}{2\sqrt{rR_T}} \ln |R_T|; \quad (24)$$

$$c_2 = -M \left(-\frac{n_2 v}{\sqrt{rR_T}} + \left(\frac{1 + n_1}{2r} - \frac{n_2 v_p}{\sqrt{4rR_T}} \right) \ln |R_T| \right). \quad (25)$$

Тогда

$$t_2 = \frac{M}{2\sqrt{rR_T}} \left(n_2 \ln \left| \frac{R_T}{r(v_p - v)^2 - R_T} \right| + (1 + n_1) \ln \left| \frac{r(v_p - v) - \sqrt{rR_T}}{r(v_p - v) + \sqrt{rR_T}} \right| \right); \quad (26)$$

$$S_2 = M \left(\frac{n_2(v_p - v)}{\sqrt{rR}} + \left(\frac{1+n_1}{2r} - \frac{n_2 v_p}{\sqrt{4rR_T}} \right) \ln \left| \frac{r(v_p - v)^2 - R_T}{R_T} \right| + \right. \\ \left. + \left(\frac{v_p(1+n_1)}{\sqrt{4rR_T}} - \frac{n_2}{2r} \right) \ln \left| \frac{2r(v_p - v) - \sqrt{4rR_T}}{2r(v_p - v) + \sqrt{4rR_T}} \right| \right). \quad (27)$$

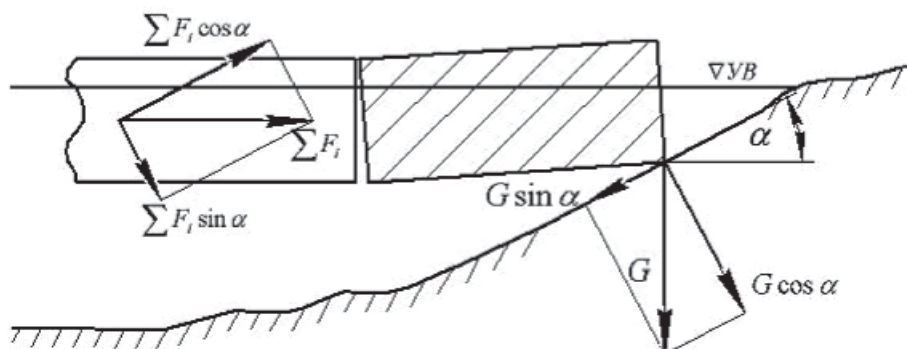


Рис. 2. Схема действующих сил при остановке плота трением о берег

Полные значения продолжительности и пути торможения соответственно равны

$$t = t_1 + t_2, \quad (28)$$

$$S = S_1 + S_2. \quad (29)$$

При использовании полученных решений в выражении (14) необходимо знать силу трения плота о плотостоянку. Эта сила при трении плота о деревянные берегоукрепительную стенку, бон, свайные кусты может быть определена как

$$F_{\text{тр}} = \sum F_i f, \quad (30)$$

где $\sum F_i$ – сумма сил упора вспомогательных судов; f – коэффициент трения, $f = 0,4$.

При остановке плота трением о берег сплотовые единицы под действием силы $\sum F_i \cos \alpha$ выталкиваются на берег (рис. 2) [3].

Уравнения равновесия имеют вид

$$F_{\text{тр}} = (\sum F_i \sin \alpha + G \cos \alpha) f_2; \quad (31)$$

$$\sum F_i \cos \alpha = G \sin \alpha + G \cos \alpha f_1, \quad (32)$$

где α – угол наклона берега; G – сила, возникающая от веса сплотовых единиц при выталкивании их на берег; f_1 – коэффициент трения скольжения сплотовой единицы при поперечном выталкивании её на берег; f_2 – коэффициент трения скольжения

сплотовой единицы при продольном протаскивании её.

Отсюда

$$F_{\text{тр}} = \left(\sum F_i \sin \alpha + \frac{\sum F_i \cos^2 \alpha}{\sin \alpha + f_1 \cos \alpha} \right) f_2. \quad (33)$$

Из выражения (33) следует, что усилие трения возрастает с увеличением коэффициента трения скольжения. Поэтому остановка плота трением о берег особенно эффективна на песчаных грунтах.

Выражения (7) и (12) позволяют определить продолжительность и путь движения плота на первом этапе торможения от скорости движения плота v_1 до скорости течения v_p при условии, что после прекращения буксировки буксировщик сразу приступает к торможению.

Выражения (26) и (27) позволяют определить продолжительность и путь торможения на втором этапе торможения от скорости течения v_p до скорости v , близкой к нулю, при которой возможно крепление плота на плотостоянке или до скорости v , равной нулю.

Выражения получены при условии, что вспомогательные суда вступают в работу с начала второго этапа, т.е. при скорости движения плота, равной v_p .

Выражения (7), (12), (26), (27) позволяют определить t_1 , S_1 , t_2 , S_2 при условии вступления в работу вспомогательных судов как на первом этапе, так и на втором.

Список литературы

1. Ватлина Я.В., Суров Г.Я. Результаты исследований сопротивления воды движению лесотранспортных единиц. ИВУЗ. Лесной журнал. – 2014. – № 2. – С. 52–62.

2. Митрофанов А.А. Лесосплав. Новые технологии, научное и техническое обеспечение: монография. – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2007. – 492 с.

3. Митрофанов А.А., Суров Г.Я. Плостостоянки. Конструкция, технология, эксплуатация: Учебное пособие. – Архангельск: РИО АГТУ, 1997. – 113 с.

4. Суров Г.Я., Ватлина Я.В. Результаты исследований разгона лесотранспортных единиц // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11 (часть 1). – С. 52–55.

5. Штаборов Д.А., Барабанов В.А. Математическая модель разгона леек из плоских сплотивных единиц // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1 (часть 1). – С. 173–176.

6. Штаборов Д.А., Барабанов В.А., Рымашевский В.Л. Результаты экспериментальных исследований по разгону моделей леек из плоских сплотивных единиц // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2014. – № 4. – С. 44–52.

References

1. Vatlina Ya.V., Surov G.Ya. *Rezultaty issledovaniya so-protivleniya vody dvizheniyu lesotransportnykh yedinitis* [The

results of the water resistance to the timber transport units motion]. Bulletin of higher education institutions. Lesnoy Zhurnal. NARFU Publ. 2014. no. 2. pp. 52–60.

2. Mitrofanov A.A. *Lesosplav. Noviyе tekhnologii, nauchnoye i tekhnicheskoye obespecheniye: monografiya* [Timber floating. New technologies, scientific and technical provisions: Monograph]. Arkhangel'sk, AGTU Publ., 2007. 492 p.

3. Mitrofanov A.A., Surov G.Ya. *Plotostoyanki. Konstruktsiya, tekhnologiya, ekspluatatsiya* [Rafts storage areas. Design, technology, operation].: Tutorial. Arkhangel'sk, ASTU Publ., 1997. 113 p.

4. Surov G.Ya., Vatlina Ya.V. *Rezultaty issledovaniy razgona lesotransportnykh yedinitis* [Results of investigations of the timber transport units] // Basic research. 2014. no. 11 (part 1). pp. 52–55.

5. Shtaborov D.A., Barabanov V.A. *Matematicheskaya model razgona linyek iz ploskikh splotochnykh yedinitis* [Mathematic model of acceleration of flat rafting units lines] // Basic research. 2013. no. 1 (part 1). pp. 173–176.

6. Shtaborov D.A., Barabanov V.A., Rimashevskiy V.L. *Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy po razgonu modelej linyek iz ploskikh splotochnykh yedinitis* [Results of experimental studies of the flat rafting units acceleration]. Bulletin of higher education institutions. Lesnoy Zhurnal. NARFU Publ. 2014. no. 4. pp. 44–52.