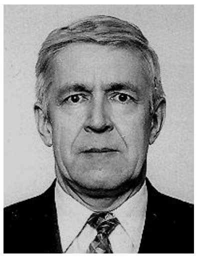
УДК 630* 378.5

Г.Я. Суров



Суров Геннадий Яковлевич родился в 1948 г., окончил в 1971 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 80 научных трудов в области водного транспорта леса.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СПЛОТОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ ПОСЛЕ СПУСКА НА ВОДУ*

Приводятся решения, позволяющие определить координаты сплоточной единицы после спуска на воду и скорость ее движения в зависимости от текущего времени.

сплоточная единица, берег, поток, движение, формировочный причал.

В связи с запрещением молевого сплава возникла проблема с организацией водного транспорта лесоматериалов по малым и средним рекам. Специально для рек с ограниченными габаритами по ширине и глубине разработаны конструкции транспортных единиц [1–4]. Предлагаемые сплоточные единицы и плоты при малой осадке и большом объеме обладают повышенной прочностью. Вид плота, состоящего из плоских сплоточных единиц, представлен на рис. 1.

---

* Работа выполнена по гранту ТОО-11.2–2300 Минобразования России.

Рис. 1

При береговой сплотке в навигационный период сплоточные единицы сплачивают на берегу, а затем спускают на воду при помощи тележек, сплоточно-транспорных агрегатов, а также сталкивают по направляющим гравитационного спуска лесоштабелерами и тракторами с толкателем [6]. На рис. 2 представлена расчетная схема перемещения сплоточной единицы после спуска на воду. Напротив берегового спуска *1* для сплоточных единиц в русле реки *2* установлено направляющее сооружение *3*, а ниже по течению – причал *4* для формирования транспортных единиц, например линеек *5*.

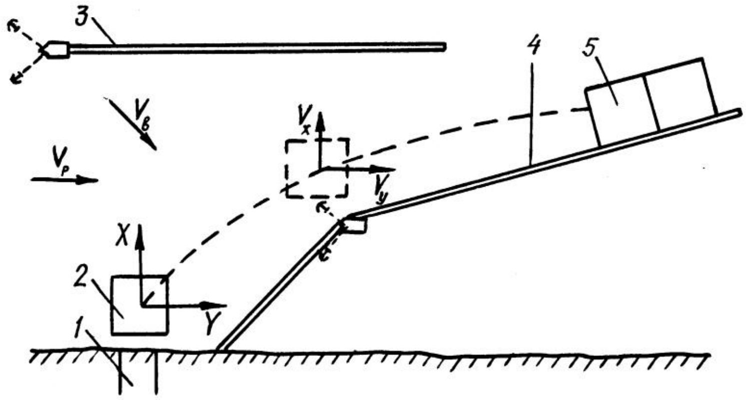


Рис. 2

Для обоснования оптимального расположения наплавных сооружений необходимо определить параметры движения сплоточной единицы после спуска на воду.

Цель статьи – определение координат положения и скорости подхода сплоточной единицы к наплавному сооружению после спуска на воду.

В системе неподвижных координат движение сплоточной единицы при направлении ветра со стороны реки может быть описано системой уравнений

$$M_x \frac{dV_x}{dt} = -R_{\text{пх}} - R_{\text{вх}}; \tag{1}$$

$$M_y \frac{dV_y}{dt} = R_{\text{п}y} \pm R_{\text{в}y} + R_i, \tag{2}$$

где M_x, M_y – действующая масса сплоточной единицы с учетом массы воды в пустотах сплоточной единицы и присоединенной массы [5], соответственно при движении по осям X и Y;

$\frac{dV_x}{dt}, \frac{dV_y}{dt}$ – составляющие ускорения движения сплоточной единицы;

$R_{\text{пх}}, R_{\text{пу}}$ – составляющие силы сопротивления потока воды движению сплоточной единицы;

$R_{\text{в}x}$, $R_{\text{в}y}$ – составляющие силы влечения сплоточной единицы ветром (знак плюс перед величиной $R_{\text{в}y}$ при совпадении с направлением оси Y, минус – при противоположном направлении);

R_i – сила влечения сплоточной единицы от уклона поверхности воды.

При решении уравнений (1) и (2) считаем, что

$$V_{\text{вх}} >> V_{\text{х}};$$

$$V_{\text{ву}} >> V_{\text{у}},$$

где $V_{\text{вх}}, V_{\text{ву}}$ – составляющие скорости ветра $V_{\text{в}}$;

V_x, V_y – составляющие скорости движения сплоточной единицы.

При квадратичном законе сопротивления

$$R_{\text{пх}} = r_x V_x^2; \tag{3}$$

$$R_{\text{пу}} = r_y (V_{\text{р}} - V_y)^2, \tag{4}$$

где r_x, r_y – приведенные сопротивления движению сплоточной единицы соответственно по осям X и Y;

$V_{\text{р}}$ – скорость течения воды в реке.

Разделив переменные в уравнении (1), получим выражение для определения времени движения сплоточной единицы t:

$$t = -M_{\text{х}} \int \frac{dV_x}{R_{\text{пх}} + R_{\text{вх}}}. \tag{5}$$

Решение выражения (5) в общем виде с учетом зависимости (3):

$$t = -\frac{M_{\text{х}}}{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}} \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} V_x + c_1, \tag{6}$$

где c_1 – постоянная интегрирования.

Так как движение сплоточной единицы начинается при скорости V_0, то начальные условия: $t = 0$, $V_x = V_0$, где V_0 – скорость движения сплоточной единицы в момент прекращения воздействия тракторного толкателя.

Тогда постоянная

$$c_1 = \frac{M_{\text{х}}}{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}} \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} V_0 \tag{7}$$

и выражение (6) принимает вид

$$t = \frac{M_{\text{х}}}{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}} \left(\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} V_0 - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_x}{R_{\text{вх}}}} V_x\right). \tag{8}$$

Решая полученное выражение относительно V_x, получаем

$$V_x = \sqrt{\frac{R_{\text{вх}}}{r_x}} \operatorname{tg}\left(\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} V_0 - \frac{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}}{M_{\text{х}}} t\right). \tag{9}$$

Тогда, интегрируя уравнение (9), находим перемещение сплоточной единицы в направлении оси X:

$$\text{х} = \int \sqrt{\frac{R_{\text{вх}}}{r_x}} \operatorname{tg}\left(\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} V_0 - \frac{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}}{M_{\text{х}}} t\right) dt. \tag{10}$$

Решение (10) в общем виде

$$\text{х} = \frac{M_{\text{х}}}{r_x} \ln \cos\left(\operatorname{arctg} V_0 \sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} - \frac{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}}{M_{\text{х}}} t\right) + c_2. \tag{11}$$

При начальных условиях $t = 0$ и $x = 0$ находим выражение для постоянной интегрирования c_2 и зависимость $x = f(t)$:

$$c_2 = -\frac{M_{\text{х}}}{r_x} \ln \cos \operatorname{arctg} V_0 \sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}}; \tag{12}$$

$$x = \frac{M_x}{r_x} \ln \frac{\cos\left(\operatorname{arctg} V_0 \sqrt{\frac{r_x}{R_{\text{вх}}}} - \frac{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}}{M_{\text{х}}} t\right)}{\cos \operatorname{arctg} V_0 \sqrt{\frac{r_x}{R_{\text{вх}}}}}. \tag{13}$$

Предельное перемещение сплоточной единицы по оси X можно определить при условии $V_x = 0$. Тогда из выражения (8) имеем

$$t_{\text{п}} = \frac{M_{\text{х}}}{\sqrt{r_x R_{\text{вх}}}} \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{r_{\text{х}}}{R_{\text{вх}}}} V_0, \tag{14}$$

где $t_{\text{п}}$ – время перемещения до достижения $V_x = 0$, а из выражения (13) соответствующее перемещение

$$x_{\text{п}} = \frac{M_x}{r_x} \ln(\cos \operatorname{arctg} V_0 \sqrt{\frac{r_x}{R_x}})^{-1} . \qquad (15)$$

Рассмотрим теперь уравнение (2). Разделив переменные, получим

$$t = M_y \int \frac{dV_y}{R_{\text{пу}} \pm R_{\text{ву}} + R_i} \qquad (16)$$

или с учетом зависимости (4)

$$t = M_y \int \frac{dV_y}{r_y (V_{\text{р}} - V_y)^2 \pm R_{\text{ву}} + R_i} . \qquad (17)$$

Знаменатель правой части последнего выражения представим как

$$r_y (V_{\text{р}} - V_y)^2 \pm R_{\text{ву}} + R_i = aV_y^2 + bV_y + c, \qquad (18)$$

где $a = r_y$;
$b = -2r_y V_{\text{р}}$;
$c = r_y V_{\text{р}}^2 \pm R_{\text{ву}} + R_i$.

Для решения уравнения (17) определим дискриминант квадратного полинома (18):

$$4ac - b^2 = 4r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i),$$

откуда следует, что $4ac - b^2 > 0$ при любом значении составляющей $R_{\text{ву}}$, если направление ее совпадает с направлением оси Y; если составляющая направлена в противоположную сторону, то $4ac - b^2 > 0$ при условии $R_{\text{ву}} < R_i$.

Проинтегрировав выражение (17) с учетом $4ac - b^2 > 0$, получим

$$t = \frac{M_y}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}} \operatorname{arctg} \frac{r_y (V_y - V_{\text{р}})}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}} + c_3 . \qquad (19)$$

При $t = 0$ $V_y = 0$, тогда

$$c_3 = \frac{M_y}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}} \operatorname{arctg} \frac{r_y V_{\text{р}}}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}} \qquad (20)$$

и, следовательно,

$$t = \frac{M_y}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}} (\operatorname{arctg} \frac{r_y V_{\text{р}}}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}} + \operatorname{arctg} \frac{r_y (V_y - V_{\text{р}})}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}}). \qquad (21)$$

Из последнего уравнения выразим переменную V_y:

$$V_y = V_{\text{р}} + \sqrt{\frac{\pm R_{\text{ву}} + R_i}{r_y}} \operatorname{tg}(\frac{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}}{M_y} t - \operatorname{arctg} \frac{r_y V_{\text{р}}}{\sqrt{r_y (\pm R_{\text{ву}} + R_i)}}). \qquad (22)$$

Обозначим постоянную величину в выражении (22) через

$$A = \operatorname{arctg}\frac{r_y V_{\text{р}}}{\sqrt{r_y(\pm R_{\text{âó}} + R_i)}}. \qquad (23)$$

Тогда перемещение сплоточной единицы в направлении оси Y

$$y = V_{\text{р}} t + \sqrt{\frac{\pm R_{\text{âó}} + R_i}{r_{\text{ó}}}} \int \operatorname{tg}\left(\frac{\sqrt{r_y(\pm R_{\text{âó}} + R_i)}}{M_y} t - A\right) dt. \qquad (24)$$

После интегрирования

$$y = V_{\text{р}} t - \frac{\text{Ì}_{\text{ó}}}{r_y} \ln\left|\cos\left(\frac{\sqrt{r_y(\pm R_{\text{âó}} + R_i)}}{M_y} t - A\right)\right| + c_4. \qquad (25)$$

При $t = 0$ $y = 0$ и, следовательно,

$$c_4 = \frac{M_y}{r_y} \ln\cos A. \qquad (26)$$

Уравнение (25) с учетом выражения (26) примет вид

$$y = V_{\text{р}} t + \frac{M_y}{r_y} \ln \frac{\cos A}{\left|\cos\left(\frac{\sqrt{r_y(\pm R_{\text{âó}} + R_i)}}{M_y} t - A\right)\right|}. \qquad (27)$$

По формулам (13) и (27) можно установить координаты положения сплоточной единицы X и Y, а по формулам (9) и (22) – составляющие скорости подхода V_x и V_y к наплавным сооружениям в зависимости от параметра текущего времени t. Зная V_x и V_y, можно определить угол β между направлением течения и вектором переменной скорости V, где V – результирующая скорость движения сплоточной единицы:

$$\beta = \operatorname{arctg}\frac{V_x}{V_y}. \qquad (28)$$

Все это позволяет найти угол подхода сплоточной единицы к наплавным сооружениям и оптимальное расположение сооружений в русле реки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1643385 СССР, МКИ[5] В 65 G 69/20. Сплоточная единица / Г.Я. Суров, В.А. Барабанов // Открытия. Изобрет. – 1991. – № 15. – С. 66.

2. Пат. 2013338 РФ, МКИ[5] В 65 G 69/20. Плот /Г.Я. Суров, В.А. Барабанов // Изобретения. – 1994. – № 10. – С. 60.

3. Пат. 2043255 РФ, МКИ[6] В 65 G 35/62. Сплоточная единица / А.А. Митрофанов, Г.Я. Суров, М.Н. Фоминцев // Изобретения. – 1995. – № 25. – С. 137.

4. Пат. 2177436 РФ, МКИ[7] В 65 G 35/62. Сплоточная единица / А.А. Митрофанов, Г.Я. Суров, Н.С. Главатских // Изобретения. – 2001. – № 36. – С. 151.

5. *Суров Г.Я.* Присоединенные массы плавающего пучка бревен при его ударе о сооружение // Лесн. журн. – 1977. – № 2. – С. 69–73. – (Изв. высш. учеб. заведений).

6. *Суров Г.Я.* Водный транспорт леса: Береговые склады: Учеб. пособие. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – 154 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 20. 03.02

G. Ya. Surov

Determination of Motion Characteristics of Rafting Unit after Launching

The solutions are provided allowing to determine coordinates of a rafting unit after launching and its travelling speed depending on the current time.