

УДК 630\*378.33

**М.С. Сергеев, М.М. Овчинников, Э.М. Гусейнов**

Овчинников Михаил Михайлович родился в 1930 г., окончил в 1954 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры водного транспорта леса и гидравлики С.-Петербургской государственной лесотехнической академии, заслуженный работник высшей школы, действительный член РАЕН и Карельского филиала РИА. Имеет более 150 печатных работ в области технологии водного транспорта леса, мелиорации лесосплавных путей и гидротехнических сооружений.



Гусейнов Эльдар Мусаевич родился в 1949 г., окончил в 1972 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств С.-Петербургской государственной лесотехнической академии. Имеет около 60 печатных трудов в области механизации лесозаготовительных и лесохозяйственных работ.



## **МОДЕЛЬ СТОЛКНОВЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОЙ СПЛОТОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ С РЕЕВЫМ БОНОМ**

Рассмотрен удар лесотранспортного модуля о реевый бон, приведена новая методика расчета средних импульсов ударных сил и момента инерции бона.

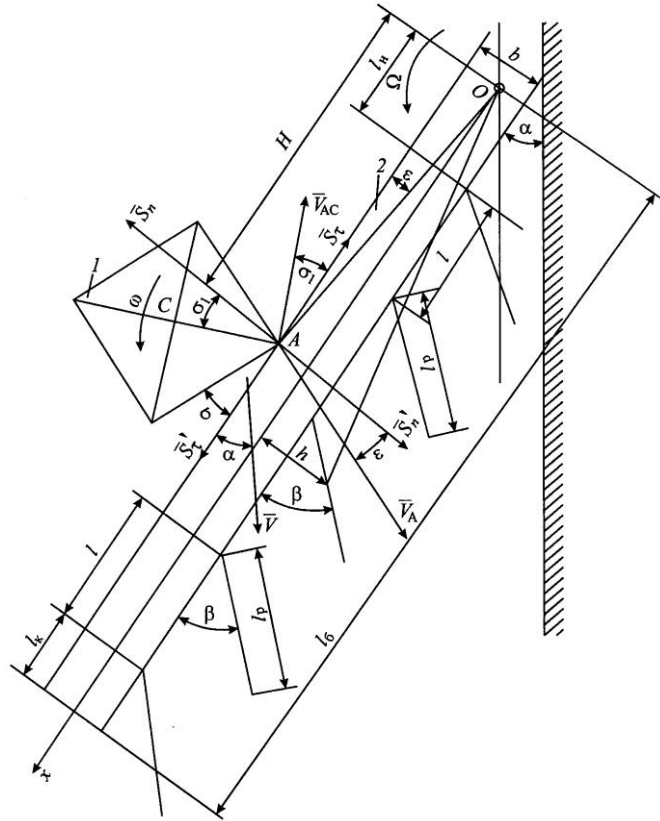
*Ключевые слова:* лесотранспортный модуль, реевый бон, ударные нагрузки, модель расчета.

Целью работы является изучение удара крупногабаритной сплотночной единицы – лесотранспортного модуля (ЛТМ) о реевый бон.

Задача исследования – разработка математической модели расчета импульса ударных нагрузок при столкновении ЛТМ с реевым боном.

При выводе расчетных зависимостей будем полагать, что до соприкосновения с лесотранспортным модулем реевый бон находился в стационарном режиме обтекания свободным потоком и имел угол  $\alpha$  между осью бона и направлением течения, численное значение которого установлено в работе [1, 4] (см. рисунок). Движение ЛТМ до удара в точке  $A$  происходило

Геометрические характеристики и угловые положения реевого бона:  
 1 – сплоточная единица;  
 2 – реевый бон



со скоростью  $V$  речного потока. Массовые параметры ЛТМ – масса  $m$  и момент инерции  $I$  относительно центра масс – определены в работе [2] с учетом плотности леса, размеров и полндревесности ЛТМ, а также осадки реевого бона.

Для установления ударных импульсов и других параметров удара необходимо знать численные значения моментов инерции бона и всех рей относительно точки  $O$  крепления бона к берегу (см. рисунок).

Число рей определено из уравнения

$$\frac{l_6 - l_n - l_k}{l} = n - 1, \tag{1}$$

где  $l_6$  – длина бона;

$l_n$  – расстояние от точки  $O$  крепления реевого бона на берегу до первой рей;

$l_k$  – расстояние от узла крепления последней рей до конца бона;

$l$  – расстояние между узлами крепления рей;

$n$  – число рей.

Было установлено, что  $n = 18$  ряем [2, 3].

Момент инерции реевого бона  $I_0$  относительно точки  $O$  состоит из суммы моментов инерции бона  $I_{об}$  и моментов инерции от всех рей  $I_{ор}$ , т. е.

$$I_O = I_{об} + I_{ор}. \quad (2)$$

На основании известных правил теоретической механики получим расчетные формулы для определения  $I_{об}$ :

$$I_{об} = \left(\frac{l_6}{2}\right)^2 m_6 + \frac{1}{3} m_6 \left[ \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_6}{2}\right)^2 \right]. \quad (3)$$

Здесь масса бона

$$m_6 = l_6 b h k \rho_{др} + l_6 b t (1 - k) \rho_в,$$

где  $b$ ,  $l_6$ ,  $h$ ,  $t$  – соответственно ширина, длина, высота, осадка шестибревенного однорядного бона с козырьком;

$k$  – коэффициент полнодревесности бона;

$\rho_{др}$ ,  $\rho_в$  – плотность соответственно древесины и воды.

Численное значение момента инерции бона при  $l_6 = 200$  м;  $b = 1,2$  м;  $h = 0,6$  м;  $t = 0,25$  м;  $k = 0,65$ ;  $\rho_{др} = 800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_в = 1000$  кг/м<sup>3</sup> равно:

$$I_{об} = 1278 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент инерции от всех рей относительно точки  $O$  может быть вычислен по формуле

$$I_{ор} = m_p \sum_{k=1}^n \left\{ \left[ l_n + \frac{l_p}{2} \cos \beta + l(k-1) \right]^2 + \left( \frac{b}{2} + \frac{l_p}{2} \sin \beta \right)^2 \right\} + n I_p, \quad (4)$$

где  $m_p$  – масса рей,  $m_p = 2c h_p 2a \rho_{др}$  ( $2c$  – ширина (толщина) рей;  $h_p$  – высота рей);

$l_p$  – длина рей,  $l_p = 2a$ ;

$\beta$  – угол установки рей к бону;

$$I_p = \frac{1}{3} m_p (c^2 + a^2).$$

При  $2c = 0,3$  м;  $l_p = 6,5$  м;  $h_p = 0,6$  м;  $\beta = 62^\circ$ ;  $l = 11$  м;  $l_n = 10$  м;  $n = 18$  шт. момент инерции  $I_{ор} = 236 \cdot 10^6$  кг · м<sup>2</sup>. Тогда общий момент инерции бона с реями

$$I_O = I_{об} + I_{ор} = 1514 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (5)$$

Составим основные уравнения теории удара. Взаимное положение плота относительно бона показано на рисунке.

На основании теоремы о движении центра масс плота имеем

$$m(\bar{V}_c - \bar{V}) = \bar{S}_\tau + \bar{S}_n, \quad (6)$$

где  $\bar{V}_c$ ,  $\bar{V}$  – скорости центра масс плота, соответственно после и до удара;

$\bar{S}_\tau$ ,  $\bar{S}_n$  – составляющие ударного импульса от бона, действующие на плот через точку  $A$  вдоль и по нормали к оси бона.

Спроектируем векторное уравнение (6) на оси координат:

$$m(V_{cx} - V \cos \alpha) = -S_\tau; \quad (7)$$

$$m(V_{cy} + V \sin \alpha) = S_n. \quad (8)$$

Используя теорему об изменении момента количества движения относительно центра масс плота, можно получить следующее уравнение моментов:

$$I\omega = S_{\tau} a \cos \sigma_1 + S_n a \sin \sigma_1, \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая скорость плота после удара;

$a$  – расстояние от центра масс плота до точки  $A$  соударения плота с боном,  $a = CA$ .

При записи уравнений (7)–(9) теории удара принято допущение, что точка  $A$  плота не скользит вдоль края бона, т. е. объединяется с точкой  $A$  бона в единое целое. Другими словами, это означает шарнирную связь плота с боном в точке  $A$ . Случай скольжения точки  $A$  плота относительно бона в данной работе не рассматривается.

При ударе ЛТМ о бон последний вращается вокруг точки  $O$  его крепления к берегу. Согласно теореме об изменении момента количества движения бона с реями можно записать

$$I_O \Omega = S'_n H + S'_{\tau} \frac{b}{2},$$

где  $\Omega$  – угловая скорость бона с реями после удара.

$H$  – расстояние от точки удара плота о бон до точки его крепления к берегу.

Так как  $\bar{S}'_n = -\bar{S}_n$ ,  $\bar{S}'_{\tau} = -\bar{S}_{\tau}$  ( $S'_n = S_n$ ,  $S'_{\tau} = S_{\tau}$ ), то последнее уравнение принимает вид

$$I_O \Omega = S_n H + S_{\tau} \frac{b}{2}. \quad (10)$$

Неизвестными в уравнениях (7)–(10) являются  $V_{cx}$ ,  $V_{cy}$ ,  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $S_{\tau}$ ,  $S_n$ , т. е. число неизвестных превышает число линейных уравнений на две единицы. По этой причине надо составить еще два линейных уравнения. Для этой цели используем условия совпадения точек  $A$  плота и бона.

Очевидно, что скорость точки  $A$  бона после удара равна:

$$\bar{V}_A = \bar{\Omega} \times \bar{OA} \quad \text{или} \quad V_A = \Omega \cdot OA,$$

а скорость той же точки  $A$ , принадлежащей плоту,

$$\bar{V}_{A_1} = \bar{V}_C + \bar{\omega} \times \bar{CA}.$$

Приравняв эти две скорости, получим векторное уравнение в следующем виде:

$$\bar{\Omega} \times \bar{OA} = \bar{V}_C + \bar{\omega} \times \bar{CA} = \bar{V}_C + \bar{V}_{AC},$$

где  $\bar{V}_{AC}$  – скорость точки  $A$  при вращении вокруг центра масс,  $V_{AC} = \omega a$  ( $a = AC$ ).

Спроектируем последнее уравнение на оси координат, тогда

$$V_A \sin \varepsilon = V_{cx} - V_{AC} \cos \sigma_1;$$

$$-V_A \cos \varepsilon = V_{cy} + V_{AC} \sin \sigma_1,$$

где  $\varepsilon$  – угол между векторами скорости точки  $A$  после удара ЛТМ о бон и ударного импульса от бона.

Последние два уравнения с учетом принятых обозначений принимают вид:

$$V_A \sin \varepsilon = V_{cx} - \omega a \cos \sigma_1; \quad (11)$$

$$-V_A \cos \varepsilon = V_{cy} + \omega a \sin \sigma_1. \quad (12)$$

Таким образом, имеем необходимое число линейных уравнений (7)–(12) для определения всех шести неизвестных  $V_{cx}$ ,  $V_{cy}$ ,  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $S_\tau$ ,  $S_n$ .

Далее воспользуемся методом Гаусса исключения неизвестных величин для решения поставленной задачи.

В уравнения (11) и (12) вместо неизвестных  $V_{cx}$ ,  $V_{cy}$ ,  $\omega$ ,  $\Omega$  подставляем их значения, найденные из уравнений (7)–(10), а именно:

$$V_{cx} = -\frac{S_\tau}{m} + V \cos \alpha; \quad (13)$$

$$V_{cy} = \frac{S_n}{m} - V \sin \alpha; \quad (14)$$

$$\omega = \frac{1}{I} (S_\tau a \cos \sigma_1 + S_n a \sin \sigma_1); \quad (15)$$

$$\Omega = \frac{1}{I_O} \left( S_n H + S_\tau \frac{b}{2} \right). \quad (16)$$

В результате преобразований получим два уравнения для определения двух неизвестных  $S_\tau$ ,  $S_n$ :

$$a_{11} S_\tau + a_{12} S_n = b_1 \quad (17)$$

и

$$a_{21} S_\tau = a_{22} S_n = b_2, \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{b^2}{4} + \frac{I_O}{m} + \frac{I_O a^2 \cos^2 \sigma_1}{I}; & a_{12} &= \frac{Hb}{2} + \frac{I_O a^2 \cos \sigma_1 \sin \sigma_1}{I}; \\ a_{21} &= -a_{12}; & a_{22} &= -H^2 - \frac{I_O}{m} - \frac{I_O a^2 \sin^2 \sigma_1}{I}; \\ b_1 &= I_O V \cos \alpha; & b_2 &= -I_O V \sin \alpha. \end{aligned} \quad (19)$$

При вычислении коэффициентов  $a$  в выражениях (19) учтено, что в силу малости угла  $\varepsilon$  (см. рисунок) принято:  $\sin \varepsilon = \frac{b}{2H}$ ,  $\cos \varepsilon = 1$ ,  $AO = K$ ,  $V_A = \Omega H$ .

Уравнения (17) и (18) запишем в матричной форме с введением квадратной матрицы

$$A_1 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix},$$

матрицы столбцов (столбцевых матриц) неизвестных  $X = \begin{vmatrix} C_\tau \\ C_n \end{vmatrix}$  и матрицы столбца свободных членов  $B_1 = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix}$ .

В итоге матричная запись уравнений (17) и (18) принимает вид

$$A_1 X = B_1. \quad (20)$$

Решение уравнения (20) запишем в форме матричной алгебры.

Введем в рассмотрение так называемую обратную матрицу  $A_1^{-1}$ :

$$A_1^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{a_{22}}{|A_1|} & \frac{-a_{12}}{|A_1|} \\ \frac{-a_{21}}{|A_1|} & \frac{a_{11}}{|A_1|} \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Умножим обратную матрицу  $A_1^{-1}$  слева на левую и правую части уравнения (20):

$$A_1^{-1} \cdot A_1 X = A_1^{-1} \cdot B_1.$$

Так как произведение обратной матрицы  $A_1^{-1}$  на матрицу  $A_1$  равно единичной матрице  $E$ , то

$$A_1^{-1} A_1 = E = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Кроме того учтем, что  $EX = X$ , тогда

$$A_1^{-1} B_1 = \begin{vmatrix} \frac{a_{22}b_1 - a_{12}b_2}{|A_1|} \\ \frac{-a_{21}b_1 + a_{11}b_2}{|A_1|} \end{vmatrix}.$$

В итоге решение уравнения (21) принимает вид, удобный для расчетов:

$$C_\tau = \frac{a_{22}b_1 - a_{12}b_2}{|A_1|}; \quad (22)$$

$$C_n = \frac{-a_{21}b_1 + a_{11}b_2}{|A_1|}, \quad (23)$$

где определитель матрицы  $|A_1|$  равен:

$$|A_1| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}.$$

Пример расчета ЛТМ. Исходные данные: плановые размеры плота  $24 \times 24$  м; масса плота  $m = 79,68 \cdot 10^4$  кг; момент инерции плота относительно центра его массы  $I = 76,24 \cdot 10^6$  кг  $\cdot$  м<sup>2</sup>; длина  $CA = a = 19,97$  м;

скорость речного потока  $V = 1,2$  м/с; стационарный угол между осью бона и берегом реки  $\alpha = 21^\circ 30'$ ; ширина бона  $b = 1,2$  м; расстояние от точки  $A$  столкновения плота вдоль оси  $X$  равно  $H = 100$  м;  $\sin \varepsilon = \frac{b}{2AO} = \frac{b}{2H}$  (принимаем в силу малости угла  $\varepsilon < 1^\circ$ ,  $AO = H$ ), углы  $\sigma = 10^\circ$ ,  $\sigma_1 = 35^\circ$ ; момент инерции бона с учетом масс всех 18 рей принимаем равным  $I_O = 1514 \cdot 10^6$  кг · м<sup>2</sup>. Приводим численные значения некоторых основных коэффициентов и величин, входящих в уравнения (17) и (18):

$$a_{11} = 5,738 \cdot 10^3; \quad a_{12} = 2,747 \cdot 10^3; \quad a_{21} = -2,747 \cdot 10^3; \quad a_{22} = -13,78 \cdot 10^3;$$

$$b_1 = 1690 \cdot 10^6 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}; \quad b_2 = -666 \cdot 10^6 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{с}}; \quad |A_1| = -71,53 \cdot 10^6.$$

Ударные импульсы  $S_\tau$  и  $S_n$ , вычисленные по формулам (22), (23), оказались равными:  $S_\tau = 30 \cdot 10^4$  кг · м/с;  $S_n = 1,147 \cdot 10^4$  кг · м/с.

Остальные неизвестные, рассчитанные по формулам (13)–(16), равны:  $V_{cx} = 0,74$  м/с;  $V_{cy} = -0,425$  м/с;  $\omega = 4,79 \cdot 10^{-2}$  1/с;  $\Omega = 0,08764 \cdot 10^{-2}$  1/с;  $V = \sqrt{V_{cx}^2 + V_{cy}^2} = 0,8533$  м/с,  $S = \sqrt{S_\tau^2 + S_n^2} = 30,02 \cdot 10^4$  кг · м/с.

Приводим средние значения ударной силы на основании теоремы о среднем значении определенного интеграла  $S = \int_0^{\Delta t} P_{уд} dt = P_{уд,ср} \Delta t$ , где  $\Delta t$  – продолжительность удара,  $P_{уд,ср} = \frac{S}{\Delta t}$ .

$\Delta t$ , с	$P_{уд} \cdot 10^{-6}$ , Н	$\Delta t$ , с	$P_{уд} \cdot 10^{-6}$ , Н
0,01	30,0	0,15	2,0
0,05	6,0	0,20	1,5
0,10	3,0	1,00	0,3

#### Выводы

1. Разработан метод расчета ударных импульсов при столкновении крупногабаритной сплочной единицы с реевым бонем при условии, что последний находится в стационарном режиме обтекания свободным речным потоком, а также при известном расчетном угле  $\alpha$  между осью бона и направлением течения реки.

2. Предложена методика расчета момента инерции реевого бона относительно вертикальной оси, проходящей через точку крепления бона к берегу. Эта методика позволяет учитывать геометрию расположения всех рей относительно бона, его осадку, полнодревесность и плотность лесоматериалов.

3. Средние значения ударной силы, полученные в работе, необходимо учитывать при расчетах узлов крепления бревен в конструкции бона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Овчинников, М.М.* Гидродинамический расчет реевого бона [Текст] / М.М. Овчинников, М.С. Сергеев // Лесоинженерное дело: сб. науч. тр. – СПб.: ЛТА, 1997. – С. 120–128.
2. *Овчинников, М.М.* Определение геометрических и массовых характеристик крупногабаритной сплочной единицы [Текст] / М.М. Овчинников, Н.П. Боброва // Изв. СПб ГЛТА, 1997. – С. 43–52.
3. *Сергеев, М.С.* Удар крупногабаритной сплочной единицы о реевый бон [Текст] / М.С. Сергеев, М.М. Овчинников // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр. – СПб.: ЛТА, 1999. – С. 91–96.
4. *Сергеев, М.С.* О взаимодействии реевого бона со свободным речным потоком [Текст] / М.С. Сергеев, М.М. Овчинников // Лесн. журн. – 2002. – № 1. – С. 61–67. – (Изв. высш. учеб. заведений).

С.-Петербургская лесотехническая  
академия

Поступила 20.02.06

M.S. Sergeev, M.M. Ovchinnikov, E.M. Gusejnov

### **Collision Model of Heavy-duty Rafting Unit with Finboom**

The collision of the forest-transport module with finboom is considered, new technique for calculating the average impulse of impact forces and finboom inertia moment is provided.

---