

УДК 630*378

М.С. Сергеев, М.М. Овчинников

Сергеев Михаил Сергеевич родился в 1922 г., окончил Ленинградскую военно-воздушную академию, доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет более 100 печатных работ по теории управления и оптимизации авиационных и военнокосмических систем, проблемам совершенствования технологии и динамики лесных машин и агрегатов.



Овчинников Михаил Михайлович родился в 1930 г., окончил в 1954 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики С.-Петербургской лесотехнической академии, академик РАЕН. Имеет более 80 печатных работ в области совершенствования технологии водного транспорта леса, разработки перспективных экологически безопасных технологических схем водного транспорта леса на базе лесотранспортных и гидротехнических модулей, гидродинамики плотового лесосплава, расчета лесосплавных гидротехнических сооружений.



О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЕВОГО БОНА СО СВОБОДНЫМ РЕЧНЫМ ПОТОКОМ

Приведен полный гидродинамический расчет реевого бона при стационарном режиме его работы, включающий уравнение равновесия моментов всех действующих сил относительно точки крепления бона к берегу, расчетные формулы для определения реакций в береговой опоре. Изложен геометрический подход к определению числа рей бона. Приведен пример расчета.

бон, рея, свободный поток, уравнение моментов, показатель обтекания.

Существующие методы расчета реевых боноразрядов базируются на допущении, что полное гидродинамическое сопротивление направлено по течению потока. Однако это неправильно. В нашей работе предложен новый подход к расчету реевых боноразрядов, основанный на составлении и решении уравнений статики для гидродинамических сил, действующих на рей и боноразряды. Силы воздействия ветра и лесоматериалов (сплоточных единиц) на лесонаправляющие сооружения не учитываем.

Расчетная схема приведена на рис. 1, где обозначено: l_6 – длина бона;

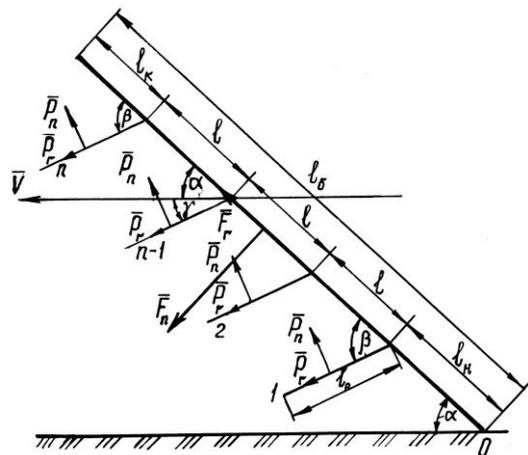


Рис. 1

l_p – длина рей; l – расстояние между рядами; l_k – расстояние от конца бона до последней рей; l_n – расстояние от точки O крепления бона к берегу до первой рей; V – скорость течения потока; α – угол установки бона к направлению течения; β – угол установки рей относительно бона; γ – угол атаки, т. е. угол между рейей и вектором скорости потока; P_r, P_n – составляющие сил, действующих на рей; F_r, F_n – то же на бон.

Как видно из схемы, углы α, β и γ связаны соотношением

$$\alpha + \gamma = \beta,$$

при этом конструктивно принимают $\beta < 90^\circ$.

Число рей n , входящих в лесонаправляющее сооружение, можно найти по уравнению

$$n = 1 + \frac{l_b - l_n - l_k}{l}.$$

Например, при $l_b = 200$ м, $l_n = 10$ м, $l_k = 3$ м и $l = 11$ м получим $n = 18$. При дробном числе n необходимо изменить размеры l_n, l_k, l и l_b для получения целого числа n .

Составим выражения для моментов сил, действующих на рей со стороны потока, относительно точки O для каждой рей в отдельности. Обозначив через P_n и P_r соответственно составляющие полной гидродинамической силы по нормали и вдоль оси рей (от первой до последней) – рис. 2, получим

$$\left. \begin{aligned} M + P_n l_n \cos \beta - P_r l_n \sin \beta; \\ M + P_n (l_n + l) \cos \beta - P_r (l_n + l) \sin \beta; \\ M + P_n (l_n + 2l) \cos \beta - P_r (l_n + 2l) \sin \beta; \\ \dots \dots \dots \\ M + P_n [l_n + (n-1)l] \cos \beta - P_r [l_n + (n-1)l] \sin \beta. \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь $M = \frac{P_n l_p}{2}$.

Просуммируем моменты от всех n рей. Учитывая, что

$$1 + 2 + 3 + \dots + (n-1) = (n-1) \frac{n}{2},$$

получаем выражение

$$n \left[M + l_n P_n \cos \beta - P_r \sin \beta \right] + \frac{1}{2} (n-1) n l \left[P_n \cos \beta - P_r \sin \beta \right].$$

Эта сумма должна быть уравновешена моментом от нормальной составляющей F_n силы сопротивления бона (рис. 3), т. е.

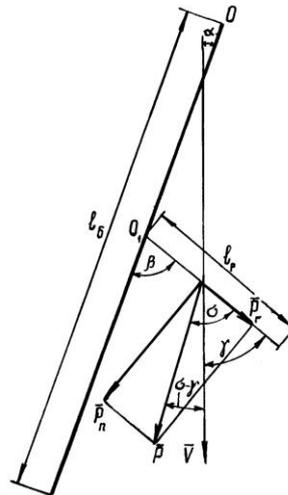


Рис. 2

$$n \left[l + l_n \left(\cos \beta - P_r \sin \beta \right) \right] + \frac{1}{2} (n-1) l \left(\cos \beta - P_r \sin \beta \right) - \frac{1}{2} F_n l_6 = 0. \quad (2)$$

При записи формул (1) и (2) принято допущение, что полная гидродинамическая сила от потока приложена соответственно посередине бона и рей. Уравнение (2) будем называть основным уравнением моментов.

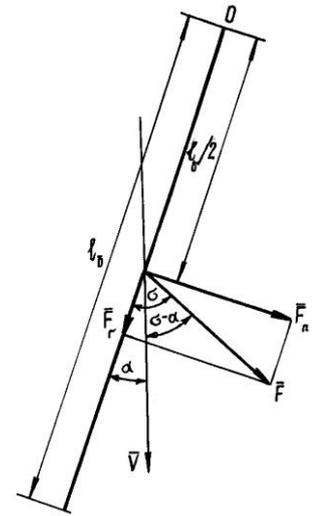
Введем обозначение показателя гидродинамического обтекания рей $K_p = P_n/P_r$. Тогда уравнение (2) принимает более простой вид:

$$nP_n \left(\frac{l_p}{2} + l_n C \right) + (n-1) \frac{n}{2} l P_n C - F_n \frac{l_6}{2} = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } C = \cos \beta - \frac{\sin \beta}{K_p}.$$

В работах [1, 2] для определения сил P_n и F_n предложены формулы

Рис. 3



$$P_n = \xi_p l_p t_p \frac{\rho V^2}{2} \sin \gamma; \quad (4)$$

$$F_n = \xi_a l_a t \frac{\rho V^2}{2} \sin \alpha, \quad (5)$$

где ξ_p – коэффициент сопротивления рей, определяемый по таблицам, приведенным в работах [1, 2];

t_p, t – осадка рей и бона;

ρ – плотность воды;

ξ_a – коэффициент сопротивления бона, определяемый по табл. 1.

После подстановки зависимостей (4) и (5) в уравнение (3) и сокращения на общий множитель ρV^2 последнее принимает вид

$$n \xi_p l_p t_p \left[\left(\frac{l_p}{2} + l_n C \right) + (n-1) \frac{n}{2} l C \right] \sin \gamma - \xi_a t \frac{l_a^2}{2} \sin \alpha = 0. \quad (6)$$

Коэффициент C , входящий в уравнение (6), зависит от показателя гидродинамического обтекания рей K_p . Для его оценки проведем дополнительные исследования. Составляющая силы воздействия потока вдоль оси бона F_r в работах [1, 2] определяется по формуле

$$F_r = f_6 b l_6 t \frac{\rho V^2}{2} \cos \alpha, \quad (7)$$

где f_6 – расчетный коэффициент сопротивления трения бона;
 b – ширина бона.

С учетом зависимостей (5) и (7) показатель обтекания бона K_6 будет равен (рис. 3):

$$K_6 = \frac{F_n}{F_r} = \frac{\xi_6 t}{f_6 b} \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \sigma. \quad (8)$$

Угол σ показан на рис. 3. Там же схематично представлено расположение векторов \vec{F}_n , \vec{F}_r и вектора полной силы сопротивления $\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_r$.

Составляющая полного сопротивления на нормаль к реи P_n вычисляется по зависимости (4) (см. рис. 2). К сожалению, в работах [1–3] не приведены формулы для определения составляющей P_r и полного сопротивления реи P . Однако численные значения показателя K_p для реи больше, чем K_6 для бона, т. е. $K_p > K_6$.

Справедливость этого неравенства обусловлена конструктивными особенностями реи: ширина погруженной в воду части реи превышает ее толщину по нормали к потоку, чего нет у бона.

Таблица 1

α , град	$\operatorname{tg} \alpha$	ξ_6	$\operatorname{tg} \sigma$	σ , град	$\sigma - \alpha$, град	$\xi_6 \sin$
Однорядный шестибревенный бон						
10	0,17632	0,43	0,8775	41,27	31,27	0,07466
15	0,26795	0,47	1,4576	55,55	40,55	0,12167
20	0,36397	0,51	2,1484	65,04	45,04	0,17440
25	0,46630	0,55	2,9684	71,38	46,38	0,23240
30	0,57730	0,59	3,9425	75,77	45,77	0,29500
Шестибревенный бон с козырьком						
10	0,17632	0,50	1,7632	60,44	50,44	0,0868
15	0,26795	0,56	3,0010	71,57	56,57	0,1449
20	0,36397	0,65	4,7316	78,07	58,07	0,2223
25	0,46630	0,77	7,1812	82,07	57,07	0,3254
30	0,57730	0,93	10,7400	84,68	54,68	0,4650

Численные значения показателя $K_6 = \operatorname{tg} \sigma$, вычисленные по формуле (8), при разных углах атаки α представлены в табл. 1 для однорядного шестибревенного бона с $b = 1,2$ м, $t = 0,25$ м, $f_6 = 0,018$ и для шестибревенного бона с козырьком при $b = 1,2$ м, $t = 0,6$ м, $f_6 = 0,025$. Эти показатели взяты из работ [1, 2].

Как видно из табл. 1, угол $\sigma - \alpha$ между вектором полного сопротивления F и вектором скорости течения V не равен нулю, т. е. вектор силы F не направлен по направлению течения, как это принято в работах [1–3]. Кроме того, в таблице приведены значения произведения $\xi_6 \sin \alpha$, необходимые для решения основного уравнения (6).

В работе [3] силы F_n и F_r рекомендуется определять по другим формулам:

$$F_n = ktV^2l_6\sin\alpha; \quad (9)$$

$$F_r = f_6bV^2l_6\cos\alpha, \quad (10)$$

где коэффициент сопротивления $k = K_6$, $t = t_6$, а коэффициент f_6 принимают равным 12,5 ... 15,0 для бона с козырьком и 9,0 для однорядного.

С учетом формул (9) и (10) выражение для коэффициента K_6 принимает вид

$$K_6 = \operatorname{tg}\sigma \frac{kt}{f_6b}. \quad (11)$$

Результаты расчета этого коэффициента и углов $\sigma - \alpha$ при разных значениях углов атаки α представлены в табл. 2 для однорядного шестибревенного бона с глубокосидящим козырьком ($b = 1,2$ м, $t = 0,6$ м, $f_6 = 12,5$) и такого же бона с козырьком из одного бревна ($b = 1,2$ м, $t = 0,4$ м, $f_6 = 12,5$).

Данные этой таблицы подтверждают предыдущий вывод о том, что вектор гидродинамического сопротивления F образует с вектором

Таблица 2

α , град	K_6	$\operatorname{tg}\sigma$	σ , град	$\sigma - \alpha$, град
Однорядный шестибревенный бон с глубокосидящим козырьком				
10	2,56	1,8055	61,02	51,02
15	2,88	3,0867	72,05	57,05
20	3,32	4,8335	78,32	58,32
25	3,94	7,3490	82,26	57,26
30	4,76	10,9927	84,80	54,80
Тот же бон с козырьком из одного бревна				
10	2,26	1,0624	46,73	36,73
15	2,47	1,7644	60,46	45,46
20	2,78	2,6975	69,66	49,66
25	3,17	3,9468	75,76	50,76
30	3,77	5,8028	80,22	50,22

5

скорости V угол $\sigma - \alpha = 31 \dots 58^\circ$. Из представленных результатов следует, что показатель обтекания бона K_6 и произведение $\xi_6\sin\alpha$ возрастают с увеличением угла атаки α и измеряются в достаточно широких пределах. Например, при $\alpha = 30^\circ$ $\xi_6\sin\alpha = 0,30 \dots 0,47$ (см. табл. 1).

Численное значение произведения $\xi_6\sin\alpha$ найдем на основании решения основного уравнения (6):

$$\xi_a \sin \alpha = n \xi_p t_p \frac{\left(\frac{l_p}{2} + l_i C \right) + \frac{n-1}{2lC}}{\frac{tl_a^2}{2}} \sin \gamma.$$

Для весьма характерного реевого бона с параметрами $l_6 = 200$ м, $b = 1,2$ м, $t = 0,6$ м, $n = 18$ рей, $\beta = 62^\circ$, $\gamma = 20^\circ$, $l_p = 6,5$ м, $t_p = 0,6$ м, $\xi_p = 1,57$, $K_p = 10$, $C = \cos \beta - \frac{\sin \beta}{K_p} = 0,38118$ имеем $\xi_6 \sin \alpha = 0,25209$, чему

соответствует угол $\alpha = 21^\circ 27'$. Линейной интерполяцией данных табл. 1 находим, что этому углу атаки α отвечает произведение $\xi_6 \sin \alpha = 0,2522$, которое отличается от расчетного только четвертым знаком после запятой, что вполне допустимо.

Определим реакцию в точке O крепления бона (см. рис. 1), для чего спроектируем все силы, действующие на бон и рей, на ось бона и на нормаль к нему. Составляющую вдоль оси бона (в сторону от берега) от всех гидродинамических сил, действующих на бон и рей, находим по формуле

$$Q_r = F_r + \mathbf{P}_r \cos \beta - P_n \sin \beta \vec{n} = F_r + P_n \left(\sin \beta + \frac{\cos \beta}{K_p} \right) n. \quad (12)$$

Составляющую по нормали к бону определяем по формуле

$$Q_n = F_n + \mathbf{P}_r \cos \beta - P_n \sin \beta \vec{n} = F_n + P_n \left(\cos \beta + \frac{\sin \beta}{K_p} \right) n. \quad (13)$$

Входящие в эти уравнения силы F_n , F_r , P_n вычисляются по формулам (4), (5) и (7).

После подстановки выражений (4), (5) и (7) формулы (12), (13) принимают вид

$$Q_r = \xi_a b l_a \cos \alpha + C_1 \xi_p l_p t_p \sin \gamma \frac{\rho V^2}{2}; \quad (14)$$

$$Q_n = \xi_a t l_a \sin \alpha + C_2 \xi_p l_p t_p \sin \gamma \frac{\rho V^2}{2}, \quad (15)$$

где $C_1 = na$; $C_2 = nc$ (здесь $a = \sin \beta + \frac{\cos \beta}{K_p}$ и $c = \cos \beta + \frac{\sin \beta}{K_p}$).

Составляющие реакции в точке O опоры равны силам Q_r и Q_n , но направлены в противоположные стороны.

Оценим эти силы для указанного реевого бона при установке его в речном потоке со скоростью течения $V = 1,2$ м/с. В этом случае при $\beta = 62^\circ$, $K_p = 10$ величина $a = 0,929897$, $c = 0,381175$ и для $n = 18$ находим

$$C_1 = 16,738; C_2 = 6,8611; Q_r = 5,1774 \cdot 10^4 \text{ Н}; Q_n = 0,2673 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

Выводы

1. Представлен расчет реевого бона при его обтекании свободным речным потоком.

2. Предложены расчетные формулы (12) и (13) для определения реакций в береговой опоре бона.

3. Введение показателя $K_p = \frac{P_n}{P_r}$ позволило существенно упростить уравнение моментов (2) и привести его к виду (6), зависящему только от конструктивных параметров бона и рей, а также от гидродинамических коэффициентов. Это дало возможность упростить и расчетные формулы (14) и (15) для вычисления составляющих реакций в опоре крепления бона.

4. Анализ составляющих сил сопротивления бона F_n и F_r и их отношения $K_\sigma = \frac{F_n}{F_r}$ показал, что полная сила сопротивления F образует с вектором скорости V угол $\sigma - \alpha$, который существенно отличается от нуля, т. е. нельзя считать, что вектор полного сопротивления бона F направлен строго по направлению скорости течения.

5. Наиболее существенное влияние на режим работы реевого бона в потоке оказывают угол установки рей β и показатель K_p (при $\alpha = \text{const}$).

6. При заданных конструктивных параметрах бона и гидродинамических коэффициентах определение числа рей n сводится к решению квадратного уравнения (6), чем существенно отличается от рекомендаций, изложенных в работах [1–3].

7. Предложенная методика расчета реевого бона предполагает использование экспериментальных данных, изложенных в работах [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донской И.П., Савельев В.В. Водный транспорт леса. – М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 286 с.
2. Пятакин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. – М.: Лесн. пром-сть, 1985. – 335 с.
3. Справочник по водному транспорту леса. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 383 с.

С.-Петербургская государственная
лесотехническая академия

Поступила 18. 10. 2000 г.

The complete hydrodynamic calculation of yard boom is given at its stationary operating conditions including the equation of the moment balance of all acting forces in relation to the boom attachment point to the bank and calculation equation for determining reactions in the coast abutment. Geometrical approach for determining the number of boom yards is provided as well as the example of calculation.
