

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СУДНО, ОЖИДАЮЩЕЕ ШЛЮЗОВАНИЯ У ПРИЧАЛЬНОЙ СТЕНКИ НИЖНЕГО ПОДХОДНОГО КАНАЛА

HYDRODYNAMIC IMPACT ON THE VESSEL EXPECTING LOCKING AT A MOORING WALL OF THE BOTTOM APPROACH CHANNEL

В статье показано, как на основе аналитически решенной задачи можно рассчитать продольную гидродинамическую силу, действующую на судно, ожидающее шлюзования у причальной стенки в нижнем подходе канале. С целью спецификации граничного условия для одномерного волнового уравнения рассчитана скорость истечения из камеры шлюза для линейной зависимости коэффициента расхода от времени.

In article it is shown how on the basis of analytically solved task it is possible to calculate the longitudinal hydrodynamic force operating on a vessel, expecting a locking at a mooring wall in the bottom approach channel. For the purpose of the specification of a boundary condition for the one-dimensional wave equation expiration speed from the lock camera for linear dependence of coefficient of an expense on time is calculated.

Ключевые слова: нижний бьеф, шлюз, подходной канал, магистральный канал, продольная гидродинамическая сила.

Key words: bottom bief, lock, approach channel, main channel, longitudinal hydrodynamic force.

ПОДХОДНЫЕ каналы к шлюзам предназначены для обеспечения удобного и безопасного входа судна в шлюз и выхода из него, отстоя судов у причалов в ожидании шлюзования, расхождения встречных судов, движения и маневрирования судов при подходе к шлюзу из реки или водохранилища. В связи с этим подходные каналы имеют большую ширину, чем магистральные каналы. В подходных каналах располагаются направляющие сооружения (палы), обычно примыкающие к головам шлюза. На участках расхождения выходящих судов с судами, ожидающими шлюзования, размещаются причальные сооружения.

Подходные каналы могут иметь различные плановые очертания в зависимости от взаимного расположения оси шлюза и осей судовых ходов в канале: симметричные, у которых оси шлюза и подходного канала совпадают, и несимметричные [1, с. 14–18]. По условиям движения судов подходной канал условно разделяют на четыре участка (рис. 1):

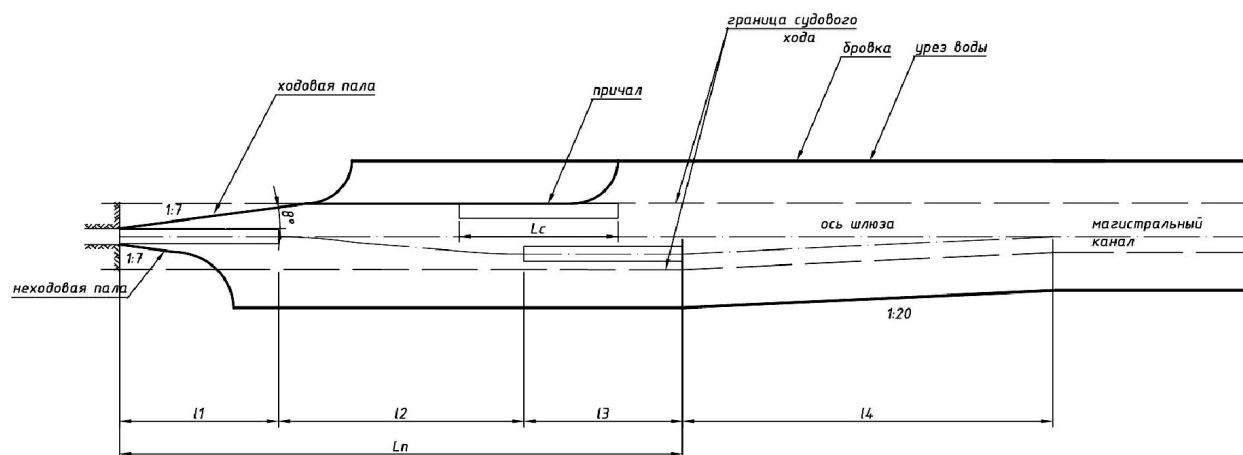


Рис. 1. Схема подходного канала

— **первый участок** — участок выхода судов из камеры шлюза, принимаемый равным длине судна (l_c) или толкаемого состава: ($l_1 = l_{c(m.c.)}$);

— **второй участок** предназначен для выполнения выходящим судном маневра по переходу судна с оси шлюза на ось судового хода на участке расхождения судов. Маневр состоит в последовательном выполнении судном правого и левого поворотов радиусом R , равным не менее трех длин расчетного судна (состава).

Длина второго участка l_2 находится по формуле

$$l_2 = \sqrt{l_c^2 + 4RC_o - C_o^2}, \text{ м}, \quad (1)$$

где C_o — смещение оси судового хода выходящего судна относительно оси шлюза, определяется по СНиП 2.06.07-87 [2] для конкретного планового очертания подходного канала;

— **третий участок** предназначен для расхождения судов. Длина третьего участка l_3 равна длине участка в камере, занимаемого судами при их расположении в камере друг за другом:

$$l_3 = \sum_1^n l_c + (n-1)\Delta L, \text{ м}. \quad (2)$$

Сумма длин первого, второго и третьего участков составляет длину нижнего участка подхода L_n , в пределах которого осуществляется маневр и расхождение встречных судов у шлюза: $L_n = l_1 + l_2 + l_3$.

Ширина подходного канала $B_{\text{подх.к}}$ на участках l_2, l_3 при поочередном движении судов по криволинейной траектории (при выполнении маневров) в двух направлениях принимается равной $B_{\text{подх.к}} = B + \Delta B$. Здесь ΔB — увеличение ширины подходного канала по сравнению с шириной магистрального канала, определяемое по формуле

$$\Delta B = 0,35 \frac{l_c^2}{R}, \text{ м}; \quad (3)$$

— **четвертый (переходный) участок** предназначен для обеспечения плавного перехода судна из широкого подходного канала в магистральный канал. Он выполняется постепенно на протяжении не менее 20 уширений ΔB , то есть $l_4 = 20\Delta B$.

Глубина воды в подходном канале должна приниматься не менее $1,3S_c$ (S_c — осадка расчетного судна в полном грузу): $S_{\text{подх.к}} = 1,3S_c$.

В пределах участка, на котором осуществляется маневр и расхождение судов (L_n), устраиваются направляющие (палы) и причальные сооружения. Палы (ходовая — с правой стороны и неходовая — с левой) обеспечивают плавный вход в камеру шлюза и выход из нее судов, в особенности при воздействии бокового ветра, а причалы необходимы для расположения судов, ожидающих шлюзования.

Длина причальной линии $L_{\text{прич}}$, отсчитываемая от верховой грани верхней головы или от низовой грани нижней головы, согласно СНиП 2.06.07-87 определяется по формулам:

при одностороннем движении судов:

$$L_{\text{прич}} = l_{\text{мин}} + \sum_1^n l_c - \gamma l_c; \quad (4)$$

при двустороннем движении судов:

$$L_{\text{прич}} = l_2 + 1,5 \sum_1^n l_c - \gamma l_c, \quad (5)$$

где $l_{\text{мин}}$ — наименьшее расстояние от низовой грани нижней головы шлюза до носа первого судна, ожидающего шлюзования у причала, определяемое в ходе лабораторных исследований при проектировании шлюза; γ — коэффициент, принимаемый равным 0,2 при расположении причала в канале или за защитными дамбами и равный нулю в остальных случаях.

Наиболее важным назначением подходного канала является обеспечение безопасных условий стоянки судов у причальных стенок в ожидании шлюзования. Теоретических исследований по определению гидродинамического воздействия на судно, ожидающего шлюзования у причальной стенки нижнего подходного канала, пока не проводилось [3].

Судно, находящееся в нижнем подходном канале у причальной стенки при опорожнении камеры шлюза, испытывает давление неустановившегося потока воды — гидродинамическую силу, которая меняется по величине и направлению. Гидродинамическая сила складывается из трех составляющих: волновой составляющей (P_1), силы, обусловленной силами трения о корпус судна и лобового сопротивления (P_2), и силы, обусловленной неравномерностью распределения скоростей по глубине потока (P_3).

Лимитирующей для нижнего подходного канала является прямая гидродинамическая сила, а обратная, возникающая при отражении волны, всегда меньше прямой и зависит от коэффициента отражения. Ограничимся рассмотрением волнового воздействия на судно при условии $x = +\infty$.

Согласно [4] продольная гидродинамическая сила, действующая на судно в подходном канале, может быть представлена (в обозначениях, принятых в настоящей работе) в следующем виде:

$$P = (x, t) = P_1(x, t) + P_2(x, t) + P_3(x, t), \quad (6)$$

где $P_1(x, t)$ — волновая составляющая гидродинамической силы, кН:

$$P_1(x, t) = \frac{W}{g(\omega_1 - \otimes)} \frac{\partial Q_1}{\partial t}(x, t); \quad (7)$$

$P_2(x, t)$ — составляющая гидродинамической силы, обусловленная силами трения о корпус судна и лобового сопротивления, кН:

$$P_2(x, t) = \kappa \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \otimes u^2(x, t); \quad (8)$$

$P_3(x, t)$ — составляющая гидродинамической силы, обусловленная неравномерностью распределения скоростей по глубине потока, кН:

$$P_3(x, t) = (\alpha - 1) P_2(x, t). \quad (9)$$

Здесь W — весовое водоизмещение судна, кН; $\otimes$ — площадь погруженной части поперечного сечения судна по миделю, m^2 ; $Q_1(x, t) = \omega_1 u_1(x, t)$ — расход воды, m^3/c ; κ — эмпирический коэффициент, зависящий от рода поверхности судна; $n = \frac{\omega_1}{\otimes}$ — коэффициент стеснения судном живого сечения подходного канала; α — коэффициент кинетической энергии потока.

Если скорость $u_1(x, t)$ в подходном канале может быть вычислена по формуле

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} R^n u_0 \left(t - 2n\tau - \frac{x}{c} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u_0 \left(t - 2n\tau + \frac{x}{c} \right), 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= T \sum_{n=0}^{\infty} R^n u_0 \left(t - 2n\tau - \frac{x}{c} \right), x > L \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

то с учетом $Q_1(x, t) = \omega_1 u_1(x, t)$ (6)–(9) полная продольная гидродинамическая сила, действующая на судно в подходном канале, может быть записана в форме

$$P(x, t) = A \frac{\partial u_1}{\partial t}(x, t) + \alpha B u_1^2(x, t), \quad (11)$$

где введены новые вспомогательные параметры:

$$A = \frac{\omega_1 W}{\omega_1 - \otimes g}, \quad (12)$$

$$B = \kappa \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \otimes. \quad (13)$$

Для практических расчетов по формуле (11) с учетом явного вида решения (10) для $u_1(x, t)$ необходимо знать зависимость от времени функции $u_0(t)$, фигурирующей в граничном условии $u_1(0, t) = u_0(t)$. Для определения функции $u_0(t)$ воспользуемся положениями, изложенными в [4], однако итоговые результаты представляют собой новые формулы, не содержащиеся в цитированной работе.

Пусть $v(t)$ — скорость истечения воды из камеры шлюза при ее опорожнении; ω_s — расчетное сечение водопроводной галереи. Тогда из условия равенства расходов должны записать: $\omega_1 u_0(t) = \omega_s v(t)$, откуда следует

$$u_0(t) = \frac{\omega_s}{\omega_1} v(t). \quad (14)$$

Найдем $v(t)$, используя соотношение, вытекающее из формулы Бернулли [4]:

$$v = \mu_t \sqrt{2gh}, \quad (15)$$

где μ_t — зависящий от времени коэффициент расхода; h — превышение уровня воды в камере шлюза.

Вместе с тем из условия равенства расходов имеем

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{\omega_s}{\Omega} v, \quad (16)$$

где Ω — площадь камеры шлюза.

Подставляя (15) в (16), приходим к замкнутому дифференциальному уравнению:

$$\frac{dh}{dt} = -\mu_t \frac{\omega_s}{\Omega} \sqrt{2gh}, \quad (17)$$

переменные в котором разделяются:

$$\frac{dh}{\sqrt{h}} = -\sqrt{2g} \frac{\omega_s}{\Omega} \mu_t dt. \quad (18)$$

Отсюда интегрированием находим

$$2(\sqrt{h} - \sqrt{h_0}) = -\sqrt{2g} \frac{\omega_s}{\Omega} \int_0^t \mu_{t'} dt', \quad (19)$$

где h_0 — превышение уровня воды в камере шлюза в начальный момент времени.

Вновь используя (15), получаем из (19):

$$v(t) = \mu_t v_b \left(1 - \frac{1}{T^*} \int_0^t \mu_{t'} dt' \right), \quad (20)$$

где введены вспомогательные обозначения:

$$v_b = \sqrt{2gh_0}, \quad (21)$$

$$T^* = \frac{v_b}{g} \frac{\Omega}{\omega_s}. \quad (22)$$

Скорость v_b в (21) — это скорость истечения в начальный момент времени, которая имела бы место в гипотетическом случае, когда затвор открывается мгновенно. Время T^* — это время опорожнения камеры, которое наблюдалась бы, если бы затвор открывался мгновенно и коэффициент расхода μ_t имел бы постоянное значение, равное единице (иными словами, это минимально возможное время опорожнения камеры).

Зададимся теперь конкретной зависимостью от времени коэффициента расхода μ_t (рис. 2).

А именно положим, что μ_t сперва нарастает во времени линейно, от значения 0 при $t = 0$ до некоторого значения μ_0 при $t = T_1 = (v_{з.п.})_{\text{доп}} / h_{з.п.}$ (должно быть равно полному времени подъема

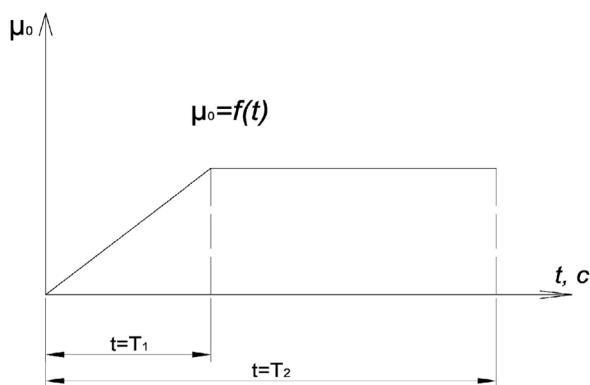


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода μ_0 от времени t

затвора опорожнения), а затем сохраняет достигнутое постоянное значение μ_0 до конца опорожнения камеры аналогично [4]. Иными словами,

$$\mu_t = \begin{cases} \mu_0 \frac{t}{T_1}, & 0 < t < T_1, \\ \mu_0, & t > T_1. \end{cases} \quad (23)$$

Тогда очевидно,

$$\int_0^t \mu_{t'} dt' = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2T_1} t^2, & 0 < t < T_1, \\ \mu_0 \left(t - \frac{T_1}{2} \right), & t > T_1, \end{cases} \quad (24)$$

и, подставляя (23)–(24) в (20), находим

$$v(t) = \begin{cases} v_b \frac{\mu_0}{T_1} t \left(1 - \frac{\mu_0}{2T_1 T^*} t^2 \right), & 0 < t < T_1, \\ v_b \mu_0 \left(1 - \frac{\mu_0}{T^*} \left\{ t - \frac{T_1}{2} \right\} \right), & t > T_1. \end{cases} \quad (25)$$

Из второго из уравнений (25), в частности, несложно увидеть, что время полного опорожнения камеры задается формулой

$$T_2 = \frac{T^*}{\mu_0} + \frac{T_1}{2}. \quad (26)$$

Тогда согласно (14) получаем граничное условие для волновой задачи в виде

$$u_0(t) = \begin{cases} v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \frac{\mu_0}{T_1} t \left(1 - \frac{\mu_0}{2T_1 T^*} t^2 \right), & 0 < t < T_1, \\ v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \mu_0 \left(1 - \frac{\mu_0}{T^*} \left\{ t - \frac{T_1}{2} \right\} \right), & T_1 < t < T_2, \end{cases} \quad (27)$$

где T_2 задается формулой (26).

Зная $u_0(t)$, можем найти $u(x, t)$ для любых x и t по системам уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} R^n u(x - ct + 2nL) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u(2nL - x - ct), & 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= T \sum_{n=0}^{\infty} R^n u(x - ct + 2nL), & x > L \end{aligned} \right\}, \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1(x, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} R^n u_0 \left(t - 2n\tau - \frac{x}{c} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u_0 \left(t - 2n\tau + \frac{x}{c} \right), & 0 < x < L \\ u_2(x, t) &= T \sum_{n=0}^{\infty} R^n u_0 \left(t - 2n\tau - \frac{x}{c} \right), & x > L \end{aligned} \right\}. \quad (29)$$

Подставляя результат расчета по формуле (28) в формулу для продольной силы (11), получим значение продольной гидродинамической силы, действующей на судно в подходном канале.

Отметим, что, поскольку в (11) фигурирует частная производная $\partial u_1(x, t)/\partial t$, при практических расчетах нужно еще почленно продифференцировать по времени ряд (28), что в итоге сведется к отысканию производной от $u_0(t)$. Действительно, дифференцируя (28) по времени, находим

$$\frac{\partial u_1}{\partial t}(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} R^n u'_0 \left(t - 2n\tau - \frac{x}{c} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} R^n u'_0 \left(t - 2n\tau + \frac{x}{c} \right), \quad 0 < x < L. \quad (30)$$

Если для коэффициента расхода μ , принята временная зависимость (23), как это было сделано выше, то соответствующее дифференцирование решения задачи об опорожнении камеры шлюза в форме (27) дает

$$u'_0(t) = \begin{cases} v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \frac{\mu_0}{T_1} \left(1 - \frac{3\mu_0}{2T_1 T^*} t^2 \right), & 0 < t < T_1, \\ -v_b \frac{\omega_s}{\omega_1} \frac{\mu_0^2}{T^*}, & T_1 < t < T_2. \end{cases} \quad (31)$$

Резюмируя, для расчета продольной гидродинамической силы, действующей на судно в некоторой точке подходного канала x в некоторый момент времени t , необходимо подставить в формулу (11) с параметрами (12)–(13) (конечные) ряды (28) и (30). Если для временной зависимости коэффициента расхода μ , принята модель (28), то в указанные (конечные) ряды надо в свою очередь подставить соотношения (27) и (31). Задав численные значения параметров системы, можем указанным методом рассчитать численное значение продольной гидродинамической силы, действующей на судно. Численные расчеты по определению гидродинамической силы на примере конкретного шлюза с построением графиков зависимостей и определением оптимального места стоянки судна в ожидании шлюзования будут представлены в следующей статье.

Таким образом, приведенное в работе аналитическое решение задачи позволяет определить гидродинамическое воздействие на судно, ожидающее шлюзования у причальной стенки нижнего подходного канала.

Список литературы

1. Бойков И. М. Основные эксплуатационные особенности подходных каналов в судоходных шлюзах / И. М. Бойков, С. А. Козлов // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: материалы IV Межвуз. науч.-практ. конф. асп., студ. и курсантов. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013.
2. СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения (актуализированная ред.). — М.: Аналитик, 2012. — 73 с.
3. Липатов И. В. Разработка средств и методов улучшения технико-эксплуатационных параметров работы судоходных шлюзов: моногр. / И. В. Липатов. — Н. Новгород, 2006. — 320 с.
4. Семанов Н. А. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
5. Бреховских Л. М. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн) / Л. М. Бреховских, В. В. Гончаров. — М.: Наука, 1982. — 336 с.
6. Соболев С. Л. Уравнения математической физики / С. Л. Соболев. — 2-е изд., перераб. — М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1950. — 424 с.