

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ



УДК 627.45.001.24

А.А. АТАВИН, В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.П. ЯНЕНКО

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КАМЕРАХ НАКЛОННЫХ СУДОПОДЪЕМНИКОВ

Для транспортировки судна с одного уровня до другого очевидно приоритетным является использование шлюза. Инженеры имеют богатый опыт конструирования бетонных конструкций, причем при относительно небольшом количестве электромеханического оборудования для выполнения операций маневрирования затворами при наполнении и опорожнении камер. Когда в нашей стране было принято решение строительства судопропускного сооружения при перепаде уровней более чем 100 м, обеспечение устойчивого судопропуска обусловило проблемы, касающиеся нестационарных гидродинамических процессов в камере наклонного судоподъемника. Их исследованию применительно к комплексу Красноярского гидроузла на р. Енисей посвящена эта статья.

К л ю ч е в ы е с л о в а: наклонный судоподъемник, нестационарные гидродинамические процессы в камере.

DOI 10.32683/0536-1052-2019-732-12-64-74

Пути обеспечения безопасности пропуска судов через судходные шлюзы детально изложены в работах [1–4]. Рассмотрение вопроса о колебаниях уровня воды, возникающих в судовозной камере наклонного судоподъемника при неравномерном ее движении по прямолинейному рельсовому пути, следует начать со случая мгновенной остановки судовозной камеры [5–9].

Пусть наполненная водой судовозная камера (без судна) равномерно движется со скоростью V_0 по наклонному рельсовому пути, угол наклона которого к горизонту равен α . Судовозная камера представляет собой прямоугольный параллелепипед шириной B_k , длиной l_k , глубина наполнения равна h_k . Вода в камере находится в состоянии относительного покоя (рис. 1).

Если при $t = 0$ произойдет мгновенная остановка судовозной камеры, то все частицы жидкости приобретут скорость, равную горизонтальной составляющей скорости равномерного движения камеры $V_0 \cos \alpha$, тогда как на торцах камеры имеют место условия непротекания. Возникает классическая задача о распаде разрыва для уравнений Сен-Венана [10, 11]. Приведем ее решение для начальной стадии процесса.

© Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П., 2019



Рис. 1. Красноярский судоподъемник

У передней (по ходу движения) торцевой стенки камеры образуется положительная обратная волна, распространяющаяся от передней торцевой стенки камеры к задней против направления движения частиц жидкости и отличающаяся крутым фронтом (прерывная волна). Эта волна отделяет область с глубиной h_k и частицами жидкости, движущимися со скоростью $V_0 \cos \alpha$, от области покоя с глубиной $h_k + \zeta_*$. Ордината свободной поверхности у правой торцевой стенки камеры $\zeta_{пр} = \zeta_*$ (рис. 2).

Высота волны ζ_* и скорость ее распространения C_* могут быть определены из алгебраических соотношений:

$$\begin{cases} C_* \zeta_* = h_k V_0 \cos \alpha, \\ h_k (C_* + V_0 \cos \alpha) V_0 \cos \alpha = g \frac{(h_k + \zeta_*)^2 - h_k^2}{2}, \end{cases} \quad (1)$$

являющихся следствием законов сохранения массы и импульса [11].

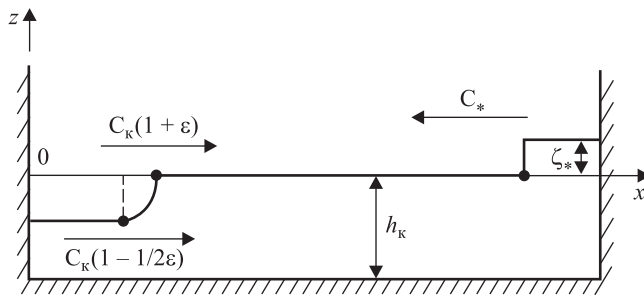


Рис. 2. Профиль свободной поверхности воды при мгновенной остановке судовозной камеры ($\epsilon = V_0 \cos \alpha / C_k$)

В работе [6] предложена итерационная процедура для вычисления ζ_* . Однако обычно начальная скорость частиц $V_0 \cos \alpha$ гораздо меньше скорости распространения малых возмущений $C_k = \sqrt{gh_k}$, что позволяет с использованием разложения в ряд по малому параметру $\varepsilon = V_0 \cos \alpha / C_k$ и получить явное выражение для высоты волны ζ_* с необходимой степенью точности. Ограничиваясь первыми членами разложения [12, 13], можно установить

$$\zeta_{\text{пр}} = \zeta_* = \varepsilon h_k \left(1 + \frac{1}{4} \varepsilon - \frac{3}{32} \varepsilon^2 \right). \quad (2)$$

Заметим, что следующий член разложения уже имеет порядок ε^5 , так что вычисления по формуле (2) при $\varepsilon < 1/3$ дают погрешность в определении ζ_* , не превышающую сотых долей процента. Более того, из (2) следует, что даже линейное приближение $\zeta_{\text{пр}} = \zeta_* = \varepsilon h_k$ для малых ε приводит к вполне удовлетворительным результатам. Так, в условиях работы Красноярского судоподъемника при $V_0 = 20$ м/мин и $h_k = 2,2$ м, $\text{tg} \alpha = 0,1$, $\varepsilon = 0,07$ получена погрешность в определении ζ_* , не превышающая 2%, что более чем достаточно при проведении практических расчетов.

Для скорости распространения возмущений C_* из (1) имеем соотношение

$$C_* = \frac{h_k V_0 \cos \alpha}{\zeta_*} = \frac{\varepsilon h_k C_k}{\zeta_*},$$

откуда с учетом (2) получаем с точностью до ε^4

$$C_* = C_k \left(1 - \frac{1}{4} \varepsilon + \frac{5}{32} \varepsilon^2 - \frac{1}{16} \varepsilon^3 \right). \quad (3)$$

У задней торцевой стенки камеры образуется прямая центрированная волна понижения (см. рис. 2), распространяющаяся к передней стенке камеры и характеризующаяся все более выполаживающимся по мере продвижения волны профилем. Передний фронт волны понижения движется со скоростью $C_k(1 + \varepsilon)$, задний — $C_k(1 - \varepsilon/2)$. Ордината свободной поверхности у левой торцевой стенки определяется при этом выражением [12]

$$\zeta_1 = \varepsilon h_k \left(1 - \frac{1}{4} \varepsilon \right). \quad (4)$$

Это имеет место при условии $\varepsilon \leq 2$ (обычно $\varepsilon \ll 1$), ибо при $\varepsilon > 2$ после мгновенной остановки вода отойдет от левого торца камеры и произойдет оголение дна, но этот случай не рассматривается, так как он не реализуется на практике.

Свободная поверхность воды в камере (при $\varepsilon < 2$) представлена на рис. 2. Этот вид сохранится до тех пор, пока не произойдет взаимодействие прямой и обратной волн (в линейном приближении $t = \frac{1}{2} T_k = \frac{l_k}{2C_k}$), а соотношения

(2) и (4) будут иметь место до тех пор, пока волны, образовавшиеся у торцов камеры в начальный момент времени, не дойдут до противоположных торцевых стенок камеры (в линейном приближении при $t = T_k = l_k / C_k$).

Результаты показывают, что если для рассматриваемых условий достаточно 2 % точности, то вместо нелинейных соотношений (2)–(4) можно ограничиться их линейным приближением:

$$C_* = C_k, \zeta_{пр} = -\zeta_{л} = \varepsilon h_k = \frac{V_0 \cos \alpha}{C_k} h_k. \quad (5)$$

Криволинейный (параболический) профиль волны понижения можно систематизировать ступенькой, распространяющейся, как и прерывная волна повышения, со скоростью C_k .

Линейное приближение позволяет, во-первых, до конца проанализировать волновую картину, возникающую как при мгновенной остановке судовозной камеры, так и при остановке по любому заданному закону, и, во-вторых, подойти к аналитическому изучению волновой картины в судовозной камере при наличии в ней транспортируемого судна. В связи с этим в дальнейшем будет использоваться только линейное приближение, приведенные выше соображения считаются аргументацией в пользу этого допущения.

Решение задачи о мгновенной остановке судовозной камеры в линейном приближении имеет следующий вид. В начальный момент времени у правой торцевой стенки камеры образуется положительная волна высотой εh_k , которая со скоростью C_k начинает распространяться к левому торцу камеры, оставляя за собой область покоя. Одновременно у левого торца камеры возникает отрицательная волна той же амплитуды εh_k , идущая к правому торцу камеры с такой же скоростью C_k и также оставляющая за собой область покоя.

Жидкость между положительной и отрицательной волнами движется вправо со скоростью $V_0 \cos \alpha$ и имеет глубину h_k . После взаимодействия волн (при $t = 0,5T_k$) они разойдутся, а жидкость между ними, сохраняя глубину h_k , будет двигаться со скоростью $V_0 \cos \alpha$, но уже влево. К тому моменту, когда волны повышения и понижения одновременно подойдут к торцам камеры, противоположным тем, у которых они образовались, жидкость во всей камере будет иметь глубину h_k и скорость $V_0 \cos \alpha$, направленную справа налево. Это произойдет при $t = T_k$. После этого в течение следующего полупериода картина в камере повторится с точностью до знаков скорости и ординаты свободной поверхности. К моменту времени $t = 2T_k$ восстановится состояние, соответствующее начальному моменту времени. Таким образом, возникает колебательный процесс с периодом $2T_k$, во время которого величина возмущения свободной поверхности жидкости ζ по модулю не превосходит εh_k .

Теперь рассмотрим задачу о торможении равномерно двигавшейся со скоростью V_0 судовозной камеры и о разгоне первоначально покоившейся судовозной камеры по произвольно заданному закону $V_k(t)$.

Введем функцию

$$u_k(t) = \begin{cases} (V_k(t) - V_k(0)) \cos \alpha & \text{при } t > 0, \\ 0 & \text{при } t \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

Заметим, что при трогании камеры с места $u_k(t)$ совпадает с горизонтальной составляющей скорости движения камеры.

Решение задачи может быть записано в виде

$$\zeta(x, t) = \frac{h_k}{C_k} \sum_{n=0}^{\infty} \left(u_k \left(t - \frac{x}{C_k} - 2nT_k \right) - u_k \left(t - \frac{x}{C_k} - 2nT_k - T_k \right) - \right. \\ \left. - u_k \left(t + \frac{x}{C_k} - 2nT_k - T_k \right) + u_k \left(t + \frac{x}{C_k} - 2nT_k - 2T_k \right) \right), \quad (7)$$

$$Q(x, t) = B_k h_k \left(\sum_{n=0}^{\infty} \left(u_k \left(t - \frac{x}{C_k} - 2nT_k \right) - u_k \left(t - \frac{x}{C_k} - 2nT_k - T_k \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + u_k \left(t + \frac{x}{C_k} - 2nT_k - T_k \right) - u_k \left(t + \frac{x}{C_k} - 2nT_k - 2T_k \right) \right) - u_k(t) \right). \quad (8)$$

Входящие в эти выражения суммы по существу являются конечными, так как для каждой фиксированной точки в плоскости (x, t) все слагаемые начиная с того номера, когда аргумент станет отрицательным, обращаются в нуль.

Задачи о разгоне и торможении камеры могут решаться независимо, так как к моменту начала торможения судовозной камеры колебания, возникающие в процессе разгона, вследствие имеющего место трения и достаточной протяженности участка равномерного движения, практически полностью затухают.

Из (7), (8), в частности, следует, что:

$$Q(x, t) = Q(l_k - x, t), \quad \zeta(x, t) = -\zeta(l_k - x, t), \quad \zeta_l = -\zeta_{пр}, \quad (9)$$

$$\zeta(l_k/2, t) = 0, \quad (10)$$

т.е. ордината свободной поверхности воды в средней по длине точке камеры остается неизменной, а профиль превышения свободной поверхности над начальным ее положением кососимметричен относительно этой точки, и ординаты свободной поверхности у торцевых стенок камеры равны по величине, но противоположны по знаку. Это означает, что можно строить решение лишь в области $0 \leq x \leq l_k/2$, поставив на правом конце ее граничное условие (10).

Следует отметить также, что после остановки судовозной камеры либо при выходе ее на режим равномерного движения решение (7), (8) становится периодическим с периодом $2T_k$, причем через полупериод T_k происходит смена фазы, а именно:

$$\zeta(x, t + T_k) = -\zeta(x, t) \text{ и } Q(x, t + T_k) = -Q(x, t), \quad (11)$$

так что явление достаточно рассмотреть лишь для интервала времени продолжительностью T_k . При движении камеры с постоянным ускорением решение (7), (8) также является периодическим с периодом $2T_k$.

На рис. 3 представлены профили свободной поверхности воды для характерных моментов времени ($t_0 = 0$, $0 < t_1 < T_k/2$, $t_2 = T_k/2$, $T_k/2 < t_3$, $t_4 = T_k$) при движении камеры с постоянным ускорением (приведен случай торможения, $j_x < 0$). В этом случае водная поверхность колеблется с периодом $2T_k$ в пределах, определяемых горизонтальной плоскостью и плоскостью, наклоненной к горизонту под углом $\arctg(-2j_x/g)$, т.е. около положения относи-

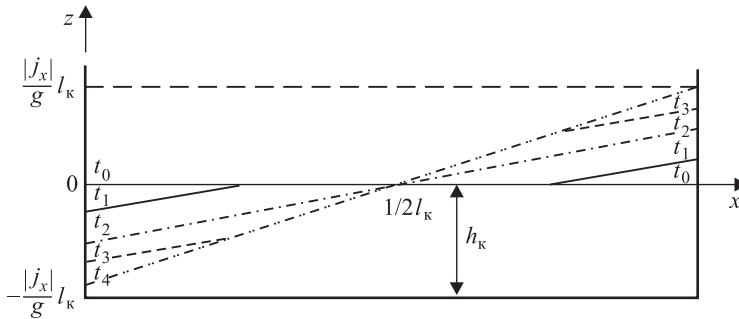


Рис. 3. Профиль свободной поверхности воды в случае движения судовозной камеры с постоянным ускорением

тельного равновесия, представляющего собой плоскость, наклоненную к горизонту под углом $(-j_x / g)$.

Наибольшие колебания уровня наблюдаются у торцевых оконечностей камеры. При торможении ($j_x < 0$) имеем:

$$\zeta_{\max}(0, t) = 0, \zeta_{\max}(l_k, t) = \frac{|j_x|}{g} l_k, \tag{12}$$

$$\zeta_{\min}(0, t) = -\frac{|j_x|}{g}, \zeta_{\min}(l_k, t) = 0.$$

При разгоне ($j_x > 0$) экстремальные значения определяются теми же выражениями (12), только левый и правый торцы камеры ($x = 0, x = l_k$) меняются местами.

График колебания уровня воды у передней торцевой стенки камеры при ($j_x = \text{const} < 0$) представлен на рис. 4.

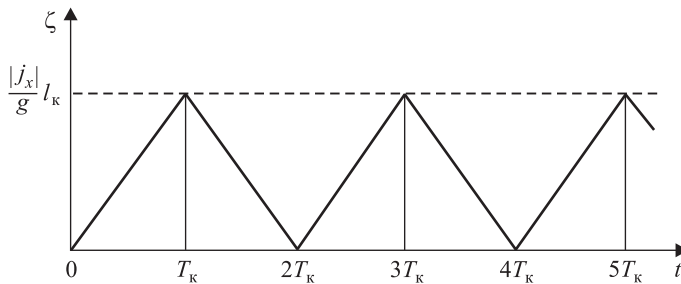


Рис. 4. Колебания уровня свободной поверхности воды у передней торцевой стенки судовозной камеры в случае движения с постоянным ускорением

Теперь рассмотрим случай равномерного торможения двигавшейся со скоростью V_0 судовозной камеры за время $T_0(j_x = -V_0 / T_0)$.

Прежде всего, будем различать «быстрое» ($T_0 \leq T_k$) и «медленное» ($T_0 > T_k$) торможение судовозной камеры. Заметим, что максимальные колебания уровня воды опять будут наблюдаться у торцевых стенок камеры.

В случае «быстрого» торможения судовозной камеры к моменту ее остановки, когда у торцов камеры заканчивается формирование волн повышения и понижения, волны не успевают добежать до противоположного торца каме-

ры и высота сформировавшихся волн получается той же, что и при мгновенной остановке судовозной камеры, т.е. определяется соотношениями (5). После остановки в камере устанавливаются колебания с периодом $2T_k$, уровень у торцевых стенок камеры колеблется в пределах

$$-\varepsilon h_k \leq \zeta \leq \varepsilon h_k. \quad (13)$$

При заданной скорости V_0 от времени торможения T_0 зависит лишь крутизна волн, но не их амплитуда (рис. 5 и 6).

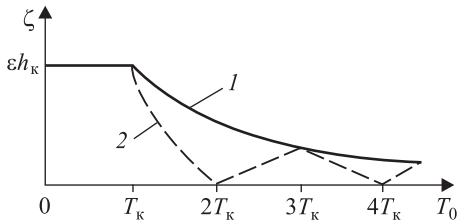


Рис. 5. Максимальное отклонение уровня свободной поверхности воды

В случае «медленного» торможения судовозной камеры волны, образовавшиеся у торцов камеры, успевают добежать до противоположных ее торцов еще до окончания процесса торможения, что приводит к колебанию уровня воды у этих стенок с периодом $2T_k$ и амплитудой $|j_x| l_k / g$. После остановки судовозной камеры свободная поверхность начинает совершать (с тем же периодом $2T_k$) колебания около положения горизонтального равновесия с амплитудой, определяемой соотношением между временем торможения T_0 и периодом $2T_k$, но не превосходящей величину $|j_x| l_k / g = \varepsilon h_k T_k / T_0$ (см. рис. 5, а также формулы (14) и (15)).

а также формулы (14) и (15)).

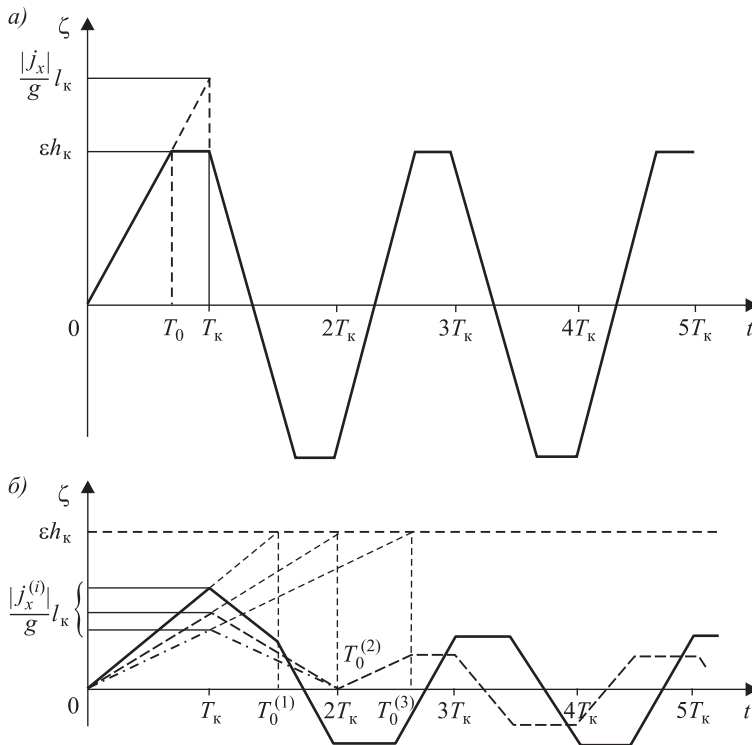


Рис. 6. Колебания уровня свободной поверхности воды у передней торцевой стенки при быстром (а) и медленном (б) торможении судовозной камеры

Из графика на рис. 5, где представлены зависимости максимального отклонения уровня свободной поверхности воды у торцевых стенок судовозной камеры в процессе торможения (кривая 1), а также амплитуды колебаний уровня после остановки камеры (кривая 2) от времени торможения T_0 , видно, что наиболее удачным представляется выбор времени торможения T_0 кратным целому числу периодов колебания ($T_0 = 2nT_k$), когда после остановки судовозной камеры вода в ней колебаться не будет, а наименее удачным – выбор $T_0 = (2n + 1)T_k$, где n – натуральное число.

На рис. 6 представлены графики колебания уровня воды в случае «быстрого» ($T_0 \leq T_k$) и «медленного» ($T_0 > T_k$) торможения судовозной камеры, первоначально двигавшейся с заданной скоростью V_0 .

В случае разгона судовозной камеры картина возникающих в камере волновых явлений отличается лишь знаком ζ и Q , т.е. передняя и задняя торцевые стенки камеры как бы меняются ролями.

Таким образом, при заданных значениях параметров судовозной камеры, скорости ее равномерного движения V_0 , а также времени разгона или торможения T_0 величина максимального отклонения уровня свободной поверхности от равновесного положения (см. кривую 1 на рис. 5) определяется формулой

$$|\zeta_{\max}| = \begin{cases} \varepsilon h_k & \text{при } T_0 \leq T_k, \\ \varepsilon h_k T_k / T_0 & \text{при } T_0 > T_k. \end{cases} \quad (14)$$

Амплитуда же максимальных колебаний, возникающих в судовозной камере после остановки судовозной камеры или при выходе ее на режим равномерного движения (см. кривую 2 на рис. 5), вычисляется по формуле

$$|\zeta_{\max}| = \begin{cases} \varepsilon h_k & \text{при } T_0 \leq T_k, \\ \varepsilon h_k |2nT_k / T_0 - 1| & \text{при } (2n - 1)T_k \leq T_0 \leq (2n + 1)T_k. \end{cases} \quad (15)$$

Распределение максимальных отклонений уровня свободной поверхности воды от невозмущенного положения по длине судовозной камеры, что может быть важным, например, при расчете прочностных характеристик судовозной камеры, представлено на рис. 7.

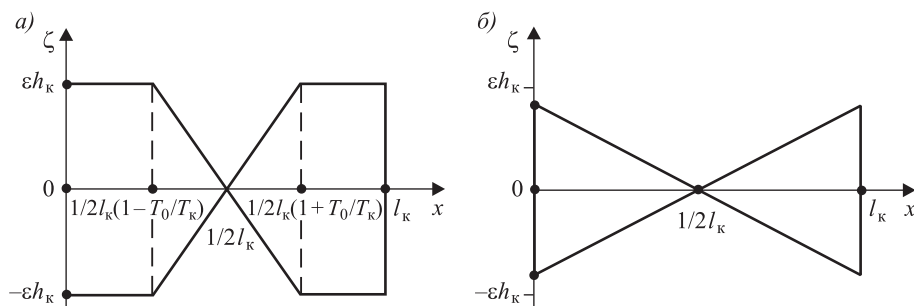


Рис. 7. Распределение максимальных отклонений уровня свободной поверхности воды по длине судовозной камеры при быстром ($T_0 \leq T_k$) (а) и медленном ($T_0 > T_k$) (б) торможении

Выводы. Необходимо заметить, что в действительности при быстрой остановке судовозной камеры на волны повышения накладываются вторичные волны (ондуляции), а также кратковременные всплески при ударе этих волн о торцевые стенки камеры. При экспериментальных исследованиях на модели Братского судоподъемника была получена эмпирическая формула для определения высоты волны повышения при мгновенной остановке камеры с учетом кратковременных всплесков, которая затем была подтверждена и в опытах на модели Красноярского судоподъемника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П. Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 47–56.
2. Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П. Об отдельных положениях «Актуализированной редакции СНиП 2.06.07–87» // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 5. С. 99–105.
3. Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Яненко А.П. О некоторых аспектах обеспечения безопасности при пропуске судов через судопропускные сооружения // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 5. С. 65–70.
4. Дегтярев В.В., Орлова Е.О., Шумкова М.Н., Яненко А.П. Обеспечение безопасности судоходства в маловодный период навигации // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 8. С. 88–95.
5. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 430 с.
6. Васильев О.Ф. Колебание жидкости в судовозной камере наклонного судоподъемника при ее мгновенной остановке // Науч. докл. высш. шк. Строительство. 1958. № 4. С. 187–194.
7. Васильев О.Ф. Задачи гидродинамического расчета наклонных судоподъемников // Изв. АН СССР. Энергетика и автоматика. 1959. № 2. С. 120–130.
8. Васильев О.Ф., Долгачев Ф.М., Каспарсон А.А., Гольцов Н.Х., Шубин Ю.Н. Экспериментальные исследования на модели наклонного судоподъемника // Режим и освоение водных объектов. М., 1962. С. 258–282.
9. Васильев О.Ф., Атавин А.А., Дегтярев В.В., Сапцин В.П., Яненко А.П. Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях // Труды научной конференции: научные и прикладные аспекты гидродинамики, гидрофизики и экологии водных объектов, посвященной 90-летию академика О.Ф. Васильева. Барнаул, 2019. С. 119–123.
10. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложение к газовой динамике. М.: Наука, 1978. 687 с.
11. Атавин А.А., Гладышев М.Т., Шугрин С.М. О разрывных течениях в открытых руслах // Динамика сплошной среды. Новосибирск, 1975. Вып. 22. С. 37–64.
12. Атавин А.А., Васильев О.Ф., Сапцин В.П. Исследование гидродинамических процессов, возникающих при работе наклонного судоподъемника Красноярского гидроузла // Тр. ин-та Гидропроект им. С.Я. Жука. 1978. № 62. С. 100–132.
13. Сапцин В.П. О выборе габаритных размеров камеры наклонного судоподъемника // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1968. № 1. С. 117–124.

Атавин Аркадий Анатольевич, канд. техн. наук, гл. науч. сотр.

Новосибирский филиал Института водных и экологических проблем СО РАН

Дегтярев Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Яненко Аркадий Петрович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 19.11.2019

Atavin Arkadiy Anatol'evich, PhD, Chief Researcher
Novosibirsk Branch of Institute for Water and Ecological Problems of SB RAS, Russia
Degtyarev Vladimir Vladimirovich, DSc, Professor
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Yanenko Arkadiy Petrovich, DSc, Professor
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

UNSTEADY HYDRODYNAMICAL PROCESSES IN TANK OF INCLINE SHIP LIFTS

The obvious solution to the problem of transporting a vessel from one level to another is, of course, the lock. Engineers have much extensive experience in the design of such structures, which are mainly constructed of concrete constructions with only a comparatively small amount equipment cooperation of the gates and filling and emptying tanks. This question does not, generally speaking, raise any particular problem. When in our country it was decided to take advantage by building more than 100 m lift-hydrodynamic complex, of ensuring continuity of navigation appeared to very complicated as far as it concern of unsteady hydrodynamic processes in tank of incline ship left. To solve this problem at the of Krasnoyarsk hydroplant on the Yenisei river, the solution of hydrodynamic problem for specitec type of construction was adapted this article.

Key words: incline ship lifts, unsteady hydrodynamic processes in tank.

REFERENCES

1. Atavin A.A., Degtyarev V.V., Yanenko A.P. Nestatsionarnyye protsessy v sudopropusknykh sooruzheniyakh [Unsteady processes in navigable hydraulic structures]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 8. Pp. 47–56. (in Russian)
2. Atavin A.A., Degtyarev V.V., Yanenko A.P. Ob otdel'nykh polozheniyakh «Aktualizirovannoy redaktsii SNiP 2.06.07–87» [About separate provisions. “The updated edition of construction norms and regulations 2.06.07–87”]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 5. Pp. 99–105. (in Russian)
3. Degtyarev V.V., Orlova E.O., Yanenko A.P. O nekotorykh aspektakh obespecheniya bezopasnosti pri propuske sudov cherez sudopropusknyye sooruzheniya [About some aspects ensuring of security in process of ships movement through navigable locks]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 5. Pp. 65–70. (in Russian)
4. Degtyarev V.V., Orlova E.O., Shumkova M.N., Yanenko A.P. Obespecheniye bezopasnosti sudokhodstva v malovodnyy period navigatsii [Navigation protection in low water navigational period]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 8. Pp. 88–95. (in Russian)
5. Samarskiy A.A., Gulina A.V. Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1989. 430 p. (in Russian)

6. Vasil'ev O.F. Kolebaniye zhidkosti v sudovodnoy kamere naklonnogo sudopod'emnika pri ee mgnovennoy ostanovke [Oscillation of liquid in ship-lifting camera inclined ship lift]. Nauchnye doklady vysshey shkoly. Stroitel'stvo [Scientific reports of Higher Educational Schools. Construction]. 1958. No. 4. Pp. 187–194. (in Russian)
7. Vasil'ev O.F. Zadachi gidrodinamicheskogo rascheta naklonnykh sudopod'emnikov [Tasks of hydrodynamical calculation of inclines]. Izvestiya AN SSSR. Energetika i avtomatika [News of AS USSR. Power energy and automation]. 1959. No. 2. Pp. 120–130. (in Russian)
8. Vasil'ev O.F., Dolgachev F.M., Kasparson A.A., Gol'tsov N.Kh., Shubin Yu.N. Eksperimental'nyye issledovaniya na modeli naklonnogo sudopod'emnika [Experimental investigations studies model of an incline]. Rezhim i osvoeniye vodnykh ob'ektov [Regim and river object development]. Moscow, 1962. Pp. 258–282. (in Russian)
9. Vasil'ev O.F., Atavin A.A., Degtyarev V.V., Saptsin V.P., Yanenko A.P. Nestatsionarnyye protsessy v sudopropusknnykh sooruzheniyakh [Unsteady process in ship lifts]. Trudy nauchnoy konferentsii: nauchnyye i prikladnyye aspekty gidrodinamiki, gidrofiziki i ekologii vodnykh ob'ektov; posvyashchennoy 90-letiyu akademika O.F. Vasil'eva [Proceeding of scientific conference: scientific and application-oriented aspects of hydrodynamics, hydrophysics and ecology water objects; dedicated to the 90th academician O.F. Vasil'ev]. Barnaul, 2019. Pp. 119–123. (in Russian)
10. Rozhdestvenskiy B.L., Yanenko N.N. Sistemy kvazilineynykh uravneniy i ikh prilozheniye k gazovoy dinamike [Quasi-linear differential equations and its application to the turs of gas denamics]. Moscow, Nauka, 1978. 687 p. (in Russian)
11. Atavin A.A., Gladyshev M.T., Shugrin S.M. O razryvnykh techeniyakh v otkrytykh ruslakh [About destruction streams in open channels]. Dinamika splotnoy sredy [Compact mass surroundings dynamics]. Novosibirsk, 1975. Vol. 22. Pp. 37–64. (in Russian)
12. Atavin A.A., Vasil'ev O.F., Saptsin V.P. Issledovaniye gidrodinamicheskikh protsessov, vznikayushchikh pri rabote naklonnogo sudopod'emnika Krasnoyarskogo gidrouzla [Investigation of hydrodynamic processes in Krasnoyarsk inclined]. Trudy instituta Gidroproekt im. S.Ya. Zhuka [Prociding Institute Hydroprogect namely by. S.Ya. Zhuka]. 1978. No. 62. Pp. 100–132. (in Russian)
13. Saptsin V.P. O vybore gaboritnykh razmerov kamery naklonnogo sudopod'emnika [About choice of construction dimensions of the incline tank]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1968. No. 1. Pp. 117–124. (in Russian)