

В.П. Сапцин, С.О. Турецких

Поволжский государственный технологический университет,
Йошкар-Ола, Россия

ПРОПУСК ЛЕСНЫХ ГРУЗОВ В КАМЕРЕ НАКЛОННОГО СУДОПОДЪЕМНИКА КРАСНОЯРСКОГО ГИДРОУЗЛА

Статья посвящена вопросам транспортировки плотов в камере транспортного наклонного судоподъемника. Вопрос экономии воды является важным в экологическом отношении преимуществом наклонных транспортных судоподъемников, особенно на средненапорных и высоконапорных гидроузлах комплексного транспортно-энергетического назначения: транспортный судоподъемник обеспечивает выработку дополнительной электроэнергии и затем – способствует улучшению систем водоснабжения. Транспортный наклонный судоподъемник осуществляет сквозной судопропуск и лесопропуск через гидроузлы, т.е. обеспечивает транзитную доставку грузов в любой пункт на данной водной магистрали без дополнительной перегрузки, что повышает эффективность самого дешевого вида перевозок – водного транспорта. Цель работы – исследование транспортного наклонного судоподъемника Красноярской ГЭС для пропуска лесных грузов в секциях плотов через гидроузел. Объектом исследования является Красноярский судоподъемник, предметом исследования – пропуск лесных грузов в плотах через гидроузел. Основой для теоретических методов исследования служат научные положения гидродинамики волновых процессов, теории и практики проектирования судопропускных сооружений. В работе изучены особенности транспортировки секций плотов в камере транспортного наклонного судоподъемника с продольной компоновкой, проведены расчеты по определению габаритных размеров секции плота из условий перевозки в камере судоподъемника Красноярского гидроузла, ввод и вывод секции плота, отстой секции плота в камере судоподъемника в период ее неравномерного движения. Дана приближенная оценка пропускной способности судоподъемника в связи с пропуском лесных грузов через Красноярский гидроузел при транспортировке плотов, поскольку в СП предлагаются завышенные скорости ввода и вывода плотов без учета реальных гидродинамических процессов, возникающих в этих случаях. Даны некоторые рекомендации по увеличению пропускной способности транспортного наклонного судоподъемника Красноярского гидроузла.

Ключевые слова: лесные грузы, секции плотов, Красноярский судоподъемник, пропускная способность, волновые процессы.

V.P. Sapsin, S.O. Turetskikh

Volga State University of Technology, Yoshkar Ola, Russian Federation

SKIP TIMBER CARGO IN THE CHAMBER OF THE INCLINED BOAT LIFT OF KRASNOYARSK WATERWORKS

The article is devoted to transportation of rafts in the chamber inclined transport ship lift. The question of water saving is an important advantage of the environmentally inclined transport boat lifts, especially in the high-pressure hydro and integrated transport and energy purposes – the Transport ship lift provides additional electricity production, and then – contributes to the improvement of water supply systems. The transport ship lift carries through the inclined locking and the wood transportation through hydro, it provides transit cargo delivery to any point on this waterway without additional overload, which increases the efficiency of the cheapest mode of transport – water transport. Objective: For the studying the transport ship lift of Krasnoyarsk HPP inclined to skip the sections of timber in rafts through hydroelectric. The object of the study is the Krasnoyarsk ship lift, the subject of the study is a pass

timber in rafts through hydroelectric. The basis for theoretical research methods are scientific principles of hydrodynamics of wave processes, the theory and practice of designing navigation openings. We studied the transport sections rafts in cell vehicle inclined ship lift with a longitudinal arrangement, the calculations to determine the overall dimensions of the raft section of the conditions of carriage in the chamber of the Krasnoyarsk hydroelectric ship lift, input and output sections of the raft, the raft section sucks ship lift in the chamber during its non-uniform motion. You can see the approximate estimate of the capacity of ship lift in connection with the omission of timber cargo through the Krasnoyarsk hydroelectric during transport rafts, as SP offered excessive speed input and output rafts without real hydrodynamic processes that occur in these cases. There are some recommendations to increase the capacity of the transport ship lift of the Krasnoyarsk waterworks.

Keywords: timber cargo, section rafts, Krasnoyarsk ship lift, carrying capacity, wave processes.

Важную роль в транспортной системе нашей страны играет водный транспорт, который во многих ее регионах порой является наиболее оправданным, а зачастую и единственным средством для доставки грузов [1]. Экономичность данного способа объясняется рядом преимуществ относительно использования железнодорожного и автомобильного транспорта в частности применение энергии потока и естественных водных путей. Кроме того, водный транспорт требует меньших первоначальных капиталовложений, удельных расходов металла и топлива на сопоставимый объем перевозок. Большинство лесоперерабатывающих предприятий спроектированы на прием древесины с воды.

В рамках Государственной программы РФ «Развитие лесного хозяйства» на 2013–2020 гг. доля использования расчетной лесосеки повысится до 50 %. Объем бюджетных ассигнований Программы к 2020 г. составит 264 927 млрд руб., из них обеспечению использования лесов отведено 69 784 476, 49 тыс. руб.

Для перемещения судов между верхним и нижним бьефами плотины традиционно используются судоходные шлюзы. Если перепад уровней в верхнем и нижнем бьефе высок, то сооружается судоподъемник. Судоподъемники имеют ряд преимуществ перед шлюзами. Они позволяют значительно экономить воду на шлюзование, обладают эффектом энергосберегающих технологий. При спуске камеры часто применяется режим динамического торможения, т.е. работа гидромоторов переходит в режим насосов, а работа двигателей – в режим генераторов. Происходит рекуперация электроэнергии в сеть. Возвращается около 25–30 % электроэнергии, затраченной на подъем. Кроме того, легче всего обнаружить утечку нефтепродуктов в подвижной камере судоподъемника и предпринять защитные меры [2, 3]. Таким образом, исследование транспортного судоподъемника является актуальной задачей для транспортировки перевозимых через гидроузел грузов.

Красноярский судоподъемник – уникальное судопропускное сооружение в России.

Гидродинамические процессы, связанные с условиями ввода (вывода) судов в камеру судопропускного сооружения, а также их транспортировка непосредственно в камере при неравномерном ее движении, изложены в научных статьях и работах [4–6]. Вопросы перевозки плотов в шлюзах с головной системой питания освещены в работе [7], однако эти условия невозможно однозначно переложить на подвижные камеры наклонного судоподъемника.

В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1985–1990 гг. и на период до 2000 г. выдвинуто важнейшее требование – полнее использовать лесосырьевые ресурсы страны без ущерба окружающей среде; обращено внимание на необходимость развития всех видов транспорта в соответствии с потребностями народного хозяйства. В таком случае экономически оправданным оказывается переключение части грузопотока с железнодорожного на водный транспорт леса и речной транспорт [8–10], что актуально и сегодня.

Экологическому состоянию водных объектов в связи с проблемой лесосплава посвящена работа [11]. Вымывание из древесины дубильных и смолистых веществ, оказывающих негативное воздействие на водную среду, происходит в течение 110 сут пребывания древесины в воде. В работе [11] отмечено, что влияние этих факторов на качество воды не проявляется, если соотношение объемов сплава леса и смывающей его воды более 1:230. В условиях Красноярского судоподъемника предлагается транспортировать плоты из зоны водохранилища, и объем его заведомо превышает вышеуказанное соотношение.

1. Особенности транспортировки плотов в камере судоподъемника Красноярского гидроузла

Плот – это однорейсовая лесотранспортная единица, состоящая из отдельных сплочных единиц, изготовленная в соответствии с техническими условиями и отвечающая требованиям данного бассейна и потребителя [8, 9]. Плоты разделяются по виду транспортируемых лесоматериалов – на сортиментные, хлыстовые и комбинированные; по условиям буксировки – на речные, озерные и морские. В Енисейском бассейне плоты (сортиментные и хлыстовые) отправляются по рекам Ангара и Енисей до Моклаково на Лесосибирский лесопромышленный комплекс [10].

Озерно-речные плоты Енисейского бассейна относятся к разряду 0, поскольку их транспортировка осуществляется по Красноярскому, Саяно-Шушенскому водохранилищам, включая зону затопления Богучанской ГЭС. Волноустойчивость плотов определяется наиболее сложными ветровыми условиями водохранилищ и рассчитаны на высоту волны 1,5–2,0 м.

Таким образом, транспортировка плотов в камере судоподъемника Красноярской ГЭС может осуществляться только в одну сторону: из верхнего бьефа в нижний. В обратном же направлении камера судоподъемника может транспортировать суда из нижнего бьефа в верхний в сторону водохранилища.

В работе [12], посвященной анализу пропуска судов через Красноярский судоподъемник, отмечается, что «в настоящее время судоподъемник справляется с грузооборотом и имеет в резерве 32 % времени, которые он простаивает в ожидании подхода судов».

Резерв времени судоподъемник может с успехом использовать для пропуска лесоматериалов из зоны Красноярского водохранилища.

Для транспортировки плотов требуется осуществить следующие мероприятия.

В акватории подходного канала в зоне Красноярского водохранилища необходимо оборудовать рейд расформирования плота на отдельные транспортные секции не ближе 85–90 м от входа в камеру судоподъемника секций плота, а в нижнем бьефе в низовом подходном канале рейд формирования не ближе 150–170 м от выходного отверстия камеры судоподъемника. В верхнем бьефе буксируемые плоты размещают у причалов, разъединяют на отдельные секции, имеющие габариты, соответствующие камере судоподъемника КГЭС с необходимыми допусками по длине и ширине, обеспечивающие беспрепятственную заводку плота в камеру судоподъемника и вывода его. При необходимости осуществляют ремонтные работы по обеспечению нормированных параметров транспортируемых плотов. С этой целью рейд должен быть оснащен необходимым оборудованием (или материалами) по утяжке такелажа, снятию его и прокладке нового.

Ввод секции плота в камеру судоподъемника Красноярского гидроузла со стороны верхнего бьефа может быть осуществлен толканием буксировочного катера; также может быть предусмотрен второй направляющий буксировочный катер для заводки передней части секции плота во входной створ камеры судоподъемника.

В нижнем бьефе выполняются работы по формированию буксировочного плота из транспортируемых секций в соответствии с принятой схемой для данного участка трассы. По мере прохождения 91Амеры судоподъемника КГЭС из верхнего бьефа через поворотный круг в нижний бьеф секции плота отбуксировывают к причальной стенке или формировочному бону, где производится формирование буксируемого плота. Продольное и поперечное крепление секций в состав буксируемого плота выполняют в соответствии с действующими в данном бассейне Правилами (ТУ) на сплотку, формирование и буксировку плотов. В случае повреждения формировочного таке-лажа в процессе транспортировки в камере судоподъемника Красноярского гидроузла поврежденные связи заменяют. На этих рейдах применяют оборудование и механизмы, предназначенные для формирования плотов.

Для транспортировки секций плота при выводе его из камеры судоподъемника необходим буксировочный катер.

2. Предлагаемые размеры секции плота в связи с габаритными размерами камеры судоподъемника

Для буксировки плотов из зоны водохранилища через гидроузел габаритные размеры плота в плане необходимо выбирать кратным размерам транспортируемых частей плота (секций), которая устанавливается из габаритных размеров камеры судоподъемника Красноярского гидроузла $87,7 \times 18 \times 2,2$ м.

В работах [3, 13] рассмотрены наиболее сложные случаи эксплуатации камеры судоподъемника – экстремальная остановка камеры в связи с обесточиванием электропривода. В ней получена зависимость назначения габаритных размеров камеры судоподъемника:

$$L_k = L_c + \frac{1}{2} \varepsilon l_c, \quad (1)$$

где L_k – габаритная длина камеры; $\varepsilon = \frac{v_x}{\sqrt{gh_k}}$ – безразмерный параметр:

v_x – горизонтальная составляющая скорости равномерного движения камеры; h_k – глубина воды в камере; l_c – длина эквивалентного параллелепипеда; L_c – габаритная длина судна.

Воспользуемся этой формулой для случая перевозки плотов [3]:

$$L_{\kappa} = L_c + \frac{1}{2} \varepsilon L_c, \quad (2)$$

где $L_c \approx L_c$ – длина секции плота.

$$L_c \approx \ell_c, \quad v_0 \approx v_x.$$

Тогда при скорости равномерного движения камеры $v_0 = 30$ м/мин = 0,5 м/с, $\varepsilon = 0,108$ длина перевозимой секции будет составлять величину $L_c = 83,2$ м.

В ближайшей перспективе намечается скорость равномерного движения камеры довести до $v_0 = 40$ м/мин = 0,67 м/с, в этом случае $\varepsilon = 0,144$ и длина секции плота $L_c = 81,6$ м. Глубина воды в камере при этом составляет 2,2 м.

Тогда секция плота будет состоять из трех пучков (примерная длина пучка 6 м) с расстоянием между пучками 0,3 м:

$$13 \cdot 6 + 12 \cdot 0,3 = 78 + 3,6 = 81,6 \text{ м.}$$

Ширина каждой секции плота 16,9 м, осадка 1,8–1,9 м.

Полнодревесность плотов оценивается коэффициентом полнодревесности $K_{\text{пл}}$, который представляет собой отношение объема леса в плоту к объему его подводной части [5–7]. Коэффициент полнодревесности сортиментных плотов колеблется от 0,39 до 0,45, а хлыстовых – 0,33–0,39. Для расчета примем средний коэффициент полнодревесности для сортиментных плотов 0,42.

Тогда при осадке плота 1,9 м фактический объем секции [3]

$$W = K_{\text{пл}} L_c B_c S_{\text{пл}} = 0,42 \cdot 81,6 \cdot 16,9 \cdot 1,9 = 1100,5 \text{ м}^3.$$

Работа [14] посвящена определению оптимальных размеров плотов. Для Северной Двины рассмотрено 14 типоразмеров плотов, причем отношение длины плота к его ширине колеблется от 4,25 до 11,2.

Для условий Енисейского бассейна примем эту величину равной 8. Тогда плот будет состоять из 15 секций с общей длиной $81,6 \cdot 5 + 4 \cdot 0,5 = 410$ м.

Ширина плота $6,9 \cdot 3 + 2 \cdot 0,3 = 51,3$ м.

Для перевозки лесоматериалов через Красноярский судоподъемник рекомендуется следующий типоразмер плота: $410 \times 51,3 \times (1,8 \dots 1,9)$ м с объемом $16\,507 \text{ м}^3$. Схематический чертеж плота приведен на рис. 1.

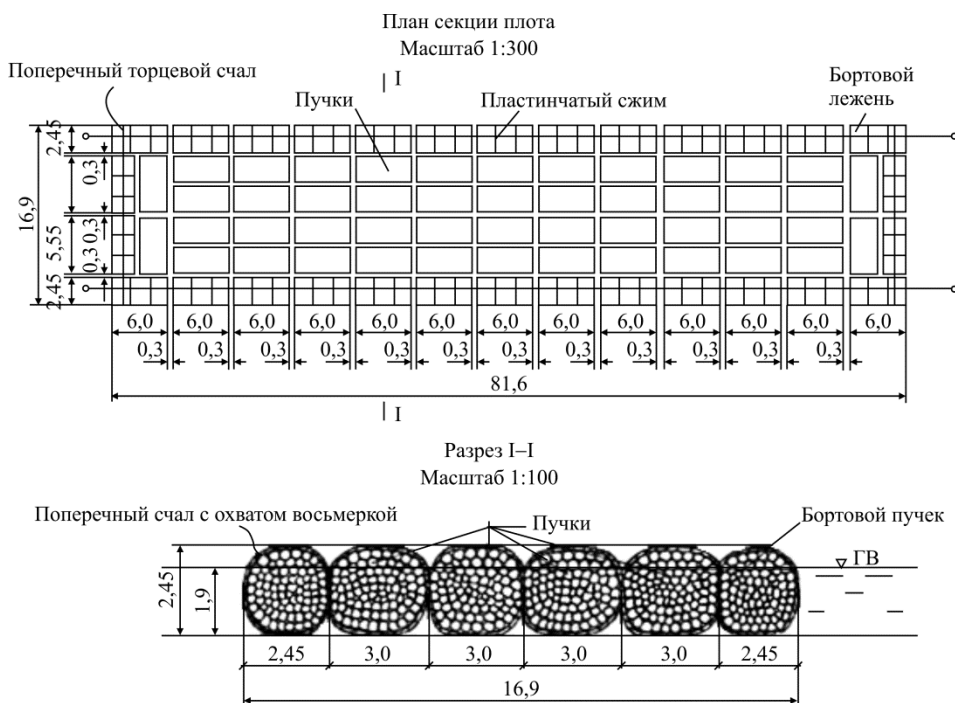


Рис. 1. Секция сортиментного плота для Красноярского судоподъемника

Перемещение секции плота в случае экстренной остановки камеры:

$$X_{\max} = \frac{1}{4} \varepsilon l_c = \frac{1}{4} \cdot 0,108 \cdot 81,6 \approx 2,2 \text{ м, при } v_0 \cong 30 \text{ м/мин} = 0,5 \text{ м/с [3].}$$

$$X_{\max} = \frac{1}{4} \varepsilon l_c = \frac{1}{4} \cdot 0,144 \cdot 81,6 \approx 2,94 \text{ м, при } v_0 \cong 40 \text{ м/мин} = 0,67 \text{ м/с [3].}$$

Запас от торцов плота до торцевых стенок камеры [3]:

$$\frac{87,7 - 81,6}{2} = 3,05 \text{ м.}$$

Перемещение плота даже в случае экстренной остановки будут в допустимых пределах при условии центрального расположения секции плота по длине камеры.

3. Теоретические основы нестационарных процессов при вводе и выводе плотов из камеры судоподъемника

Теоретические обоснования процессов при вводе и выводе судов из камеры судопропускного сооружения с учетом реальной волновой картины подробно изложены в работах А.А. Атавина и А.П. Яненко

[4, 6]. Действительно, при эксплуатации существующих сооружений (судоходных шлюзов, судоподъемников) возникает следующая ситуация: фактическая грузопропускная способность сооружения оказывается меньше расчетной ввиду значительного времени, затраченного на ввод судна в камеру и, соответственно, вывод. Основной причиной являются малые скорости ввода (вывода) судна по сравнению с нормальным¹ [12].

В реальной ситуации наблюдается следующая физическая картина, проверенная на модельной установке и подтвержденная теоретическими разработками [4]: из подходного канала (акватории верхнего бьефа) судно входит в тупиковый участок канала прямоугольного сечения (камеру), причем глубина воды в нем значительно меньше, чем глубина воды в подходном канале. Перед носовой оконечностью судна при вводе его в камеру возникает повышение уровня воды, судно приобретает дифферент на корму. За счет повышения уровня воды из тупикового участка канала (камеры) в сторону подходного канала, из которого входит судно, будет двигаться расход воды, фактически состоящий из двух основных частей: в зазорах между стенками и бортами судна и под днищем судна. Таким образом, при достижении носовой оконечностью судна входного участка тупикового канала, по поперечному сечению резко отличающегося от подходного канала в меньшую сторону, возникает сопротивление вводимому судну за счет встречного расхода воды: оно будет сказываться на тяговом усилии при вводе или же при небольших зазорах по глубине к посадке днищем судна на дно камеры. В качестве одного из упрощающих при вводе (выводе) судна в камеру судопропускного сооружения при теоретических выкладках сделано допущение о пренебрежении инерцией судна (вместе с присоединенной массой воды), т.е. это допущение равносильно тому, что судно в своих вертикальных колебаниях следует за водной поверхностью [4, 6].

Рассмотрим теперь поведение секции плота при вводе (выводе) в камеру судопропускного сооружения. Действительно, секция плота, которая будет транспортироваться в камере судоподъемника Красноярского гидроузла и которая является составной частью плота в целом, представляет собой гибкую конструкцию, как в продольном, так и в поперечном направлении (см. рис. 1). В этом случае более правомерно допущение о пренебрежении инерцией плота.

¹ СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные сооружения. Актуализированная редакция СП 2.06.07–87 (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.12 № 267) // Доступ через справ.-правовую систему «КонсультантПлюс».

Воспользуемся аналитическими зависимостями [4, 6], переложив их на условия ввода (вывода) секции плота в камеру судоподъемника КГЭС. Эти формулы получены в предложении мгновенного набора секцией плота постоянной скорости.

Для условий вывода секции плота [3]:

$$\zeta_{\min} = -\Delta h = \frac{V_{\text{пл}} \cdot \Omega_{\text{пл}}}{\sqrt{gB_{\text{к}} (B_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}} - \Omega_{\text{пл}})}}, \quad (3)$$

где ζ_{\min} – максимальное понижение уровня воды в камере; $V_{\text{пл}}$ – постоянная скорость секции плота; $\Omega_{\text{пл}}$ – площадь миделя секции плота; g – ускорение свободного падения; $B_{\text{к}}$ – ширина камеры судоподъемника; $h_{\text{к}}$ – глубина воды в камере судоподъемника.

Для величины максимального повышения уровня воды [3]:

$$\zeta_{\max} = \frac{\mu_{\text{пл}}}{\mu_* + \mu_{\text{пл}}} \Delta h = \varepsilon_* \Delta h, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{пл}} = \sqrt{1 - \sigma_{\text{пл}}} = \sqrt{1 - \frac{\Omega_{\text{пл}}}{B_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}}}$ и $\mu_* = \sqrt{\sigma_{\text{нк}} \cdot \beta_{\text{нк}}} = \sqrt{\frac{B_{\text{нк}(0)}}{B_{\text{к}}} \cdot \frac{\omega_{\text{нк}(0)}}{B_{\text{к}} \cdot h_{\text{к}}}}$.

Здесь $B_{\text{нк}(0)}$ – ширина подходного канала по урезу воды в створе с начальным сечением камеры; $\omega_{\text{нк}(0)}$ – площадь живого сечения подходного канала в том же створе.

Вытекающий из камеры расход воды определяется по формуле [3]

$$Q_{\text{к}} = (1 - \varepsilon_*) V_{\text{пл}} \Omega_{\text{пл}}, \quad (5)$$

а расход воды, протекающий под секцией плота, – по формуле [3]

$$Q_{\text{кпл}} = \varepsilon_* V_{\text{пл}} \Omega_{\text{пл}}. \quad (6)$$

Тяговое усиление, необходимое для вывода секции плота из камеры [3]:

$$F = (1 + \varepsilon_*) \gamma \Omega_{\text{пл}} \Delta h = (1 + \varepsilon_*) \gamma \frac{V_{\text{пл}} \cdot \Omega_{\text{пл}}^2}{\sqrt{gB_{\text{к}} (B_{\text{к}} h_{\text{к}} - \Omega_{\text{пл}})}}, \quad (7)$$

где $\gamma = \rho g$ – объемная масса воды.

Критическая скорость секции плота при выводе [3]:

$$V_{\text{пл}}^{<\text{кр}>} = \frac{3}{8} \frac{h_{\text{к}} - S_{\text{пл}}}{\Omega_{\text{пл}}} \sqrt{gB_{\text{к}} (B_{\text{к}} h_{\text{к}} - \Omega_{\text{пл}})}, \quad (8)$$

где $S_{\text{пл}}$ – осадка секции плота.

При этом колебание кормовой оконечностью секции плота происходит на величину [3]:

$$\eta_{\text{min}} = \frac{8}{3} \Delta h. \quad (9)$$

Задаваясь величиной тягового усилия, можно определить предельно допустимую скорость секции плота при выводе (вводе) [3]:

$$V_{\text{пл}}^{<\text{max}>} = (1 - \varepsilon_*) \frac{F}{\gamma \Omega_{\text{пл}}^2} \sqrt{gB_{\text{к}} (B_{\text{к}} h_{\text{к}} - \Omega_{\text{пл}})}. \quad (10)$$

При вводе секции плота в камеру судоподъемника Красноярского гидроузла у носовой оконечности плота образуется волна повышения, амплитуда которой может быть оценена величиной, определяемой по формуле (3), что также приводит к ограничению скорости при вводе секции плота в камеру (формулы (8)–(10)).

Таким образом, если сохраняются одинаковые условия примыкания камеры и подходного каналов в верхнем и нижнем бьефах, то можно считать ввод и вывод секции плота по одним и тем же зависимостям, или же выбираются наилучшие условия, как это было рассчитано для низового подходного канала Красноярского судоподъемника (таблица).

4. Условия транспортировки секции плота при неравномерном движении камеры судоподъемника

Колебательные процессы в камере наклонного судоподъемника при ее неравномерном движении по судовому пути с судном изложены в работах [5, 6]. При этом предполагается транспортировка судна, близкого по своим размерам к размерам камеры, что аналогично условиям транспортировки секции плота в камере судоподъемника.

Рассмотрим неучаленную секцию плота. Лабораторные исследования показали, что период колебаний волн в камере при наличии неучаленного плота практически совпадает с периодом колебаний волн при отсутствии плавающих тел.

Условия ввода (вывода) секции плота для Красноярского судоподъемника

Ширина секции плота В, м	Осадка секции плота, м	$\Omega_k, \text{ м}^2$ 18 × 2,2	$\Omega_{\text{пл}}, \text{ м}^2$	$V_{\text{пл}}^{\text{<ср>}}$, м/с	ξ_{min} , м	η_{min} , м	$\mu_{\text{пл}}$	μ_*	ε^*	ζ_{max} , м	Q_k , м ³ /с	$Q_{k,\text{пл}}$, м ³ /с	F, Т	$V_{\text{пл}}^{\text{<max>}}$, м/с
15,9	1,80	39,6	28,62	0,23	-0,15	-0,400	0,526	4,59	0,100	0,015	5,92	0,66	4,72	0,22
	1,85	39,6	29,42	0,19	-0,13	-0,347	0,507	4,59	0,099	0,013	5,04	0,55	4,20	0,18
	1,90	39,6	30,21	0,15	-0,11	-0,297	0,487	4,59	0,096	0,011	4,10	0,44	3,68	0,14
16,5	1,80	39,6	29,70	0,21	-0,15	-0,400	0,500	4,59	0,098	0,015	5,65	0,61	4,89	0,20
	1,85	39,6	30,53	0,17	-0,13	-0,349	0,479	4,59	0,094	0,012	4,76	0,49	4,37	0,16
	1,90	39,6	31,35	0,14	-0,11	-0,300	0,456	4,59	0,090	0,010	3,90	0,39	3,84	0,13
16,9	1,80	39,6	30,42	0,20	-0,15	-0,400	0,480	4,59	0,095	0,014	5,48	0,58	5,00	0,19
	1,85	39,6	31,27	0,16	-0,13	-0,349	0,458	4,59	0,091	0,012	4,58	0,46	4,47	0,15
	1,90	39,6	32,11	0,13	-0,11	-0,299	0,435	4,59	0,087	0,010	3,72	0,36	3,90	0,12

Наиболее быстрым эксплуатационным режимом движения камеры будет трапецеидальный график набора скорости, при котором время разгона (торможения) при постоянном ускорении (замедлении) соответствует величине $2T_k$ [3].

Здесь $T_k = \frac{L_k}{C}$ – время пробега волны возмущения от одной торцевой стенки до другой, $C = \sqrt{gh_k}$ – скорость распространения волны возмущения.

Для Красноярского судоподъемника $L_k = 87,7$ м.

$$T_k = \frac{87,7}{4,65} = 19 \text{ с. } 2T_k = 38 \text{ с.}$$

При скорости движения $v_0 = 30$ м/мин = 0,5 м/с ускорение движения камеры при разгоне будет $j_x = \frac{V_x}{2T_k} = \frac{0,5}{38} = 0,0132 \text{ м/с}^2$.

Высота волны определяется по следующей формуле [3, 5, 6]:

$$\zeta_{\max}(0, t) = -\zeta_{\min}(L_k, t) = \frac{j_p}{g} L_k = \frac{00132}{9,81} \cdot 87,7 = 0,12 \text{ м.} \quad (11)$$

Продольные перемещения секции плота соизмеряемого с размерами камеры можно определить по следующей зависимости [3]:

$$X_{\max} = -\frac{v_0 T_k}{12} = -\frac{0,5 \cdot 19}{12} = -0,792 \text{ м.} \quad (12)$$

С учетом реальных размеров секции плота и волновой силы, воздействующей на нее в период разгона, продольные перемещения будут несколько большими путем умножения на коэффициент 1,0645.

$$X_{\max} = -0,792 \cdot 1,0645 = -0,843 \text{ м.}$$

Знак «−» означает продольное перемещение секции плота против движения камеры, знак «+» – по движению камеры.

При разгоне неукаленная секция плота совершит продольные перемещения к заданной торцевой стенке камеры, максимальной величины в 0,843 м достигнет через 19 с после движения камеры, затем секция плота возвратится в свое первоначальное центральное положение. До начала торможения будет находиться в относительном покое.

Это не означает, что предлагается не расчаливать секцию плота: расчаливать нужно легкими тросами с провисом во избежание предвари-

тельного перемещения плота от центрального положения до начала движения камеры, например от ветра. Очень важно, чтобы усилия в тросах не выбили секцию плота из фазы колебаний волны, возникающей в период разгона камеры и притормаживающей перемещение плота.

При торможении продольные перемещения секции плота произойдут в противоположную сторону, к пульту управления. В перспективе при скорости равномерного движения камеры, равной $v_0 = 40 \text{ м/мин} = 0,67 \text{ м/с}$, время разгона (торможения) останется равным 38 с, а ускорение при разгоне достигнет величины $0,0176 \text{ м/с}^2$. Амплитуда волны будет равна 0,16 м, а продольные перемещения секции плота составят величину в 1,13 м.

Результаты расчета скорости и продольного перемещения лесовозной баржи при разгоне за $2T_k$ представлены на рис. 2.

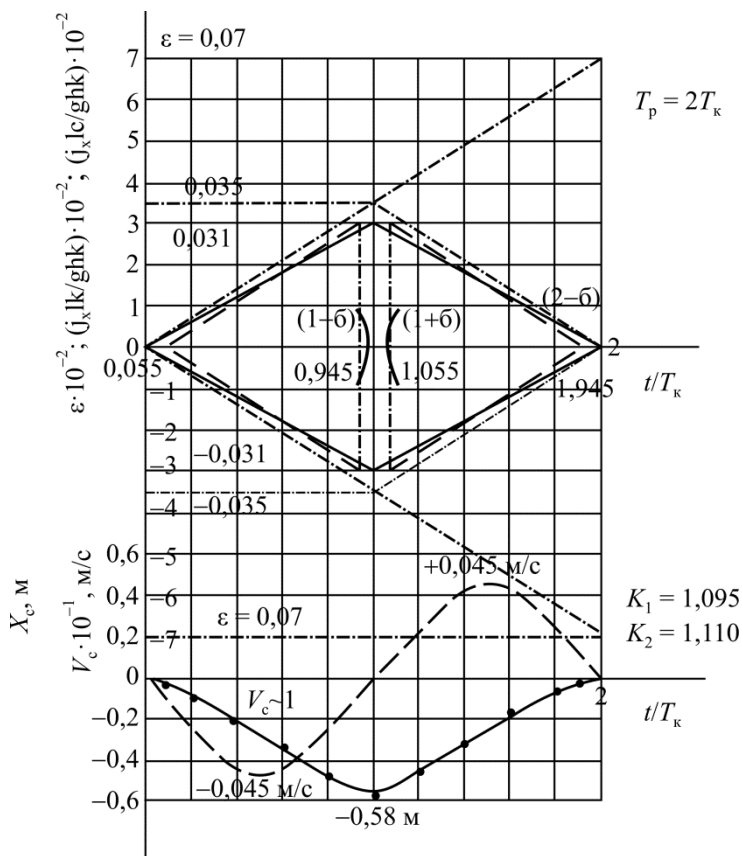


Рис. 2. Результаты расчета скорости и продольного перемещения лесовозной баржи при разгоне за $2T_k$ [3]: a – амплитуды волн у оконечностей судна; b – параметры движения неучаленного судна

Для нахождения усилий в швартовых тросах можно воспользоваться зависимостями, приведенными в работе [5].

5. Пропускная способность судоподъемника Красноярского гидроузла в связи с пропуском лесоматериалов

Секция плота $81,6 \times 16,9 \times 1,9$ м вводится в камеру со стороны верхнего бьефа со скоростью $0,2$ м/с (см. табл. 1), т.е. в 3 раза меньше, чем рекомендуют СП [11]. Расстояние при вводе и выводе секции плота принимается как для двухстороннего шлюзования [11, формула (3)] – по 300 м.

$$\text{Время входа (вывода) в камеру: } \frac{300}{0,2} = 1500 \text{ с} = 25 \text{ мин.}$$

При скорости равномерного движения камеры $v_0 = 30$ м/мин = $0,5$ м/с длина пути при разгоне (торможении) камеры

$$S_p = 0,0132 \cdot \frac{38^2}{2} = 9,5 \text{ м.}$$
 Длина верхового пути вместе с поворотным устройством 411 м. Равномерный путь со стороны верхнего бьефа

$411 - 19 = 392$ м, время равномерного пути $\frac{392}{0,5} = 784 \text{ с} = 13 \text{ мин}$. Дви-

жение поворотного устройства 19 мин. Длина низового рельсового пути вместе с поворотным устройством 1294 м. Равномерный путь нижнего бьефа $1294 - 19 = 1275$ м, время равномерного пути $\frac{1275}{0,5} = 2550 \text{ с} = 42,5 \text{ мин}$. Полное время пропуска секции плота со сто-

роны верхнего бьефа в нижний будет составлять:

$$T_{v_0=0,5 \text{ м/с}} = 25 + 1,27 + 13 + 19 + 1,27 + 42,5 + 25 = 127,04 \text{ мин} \approx 2 \text{ ч.}$$

При скорости равномерного движения камеры $v_0 = 40$ м/мин = $0,67$ м/с длина пути при разгоне (торможении) камеры

$$S_p = 0,0176 \cdot \frac{38^2}{2} = 12,7 \text{ м.}$$
 Длина верхового пути вместе с поворотным устройством 411 м. Равномерный путь со стороны верхнего бьефа

$411 - 25,4 = 385,6$ м, время равномерного пути

$$\frac{385,6}{0,67} = 575,5 \text{ с} = 9,6 \text{ мин.}$$
 Движение поворотного устройства 19 мин.

Длина низового рельсового пути вместе с поворотным устройством 1294 м. Равномерный путь нижнего бьефа $1294 - 25,4 = 1268,6$ м, время равномерного пути $\frac{1268,6}{0,67} = 1893,4$ с = 31,6 мин.

Полное время пропуска секции плота со стороны верхнего бьефа в нижний будет составлять:

$$T_{v_0=0,67 \text{ м/с}} = 25 + 1,27 + 9,6 + 19 + 1,27 + 31,6 + 25 = 112,74 \text{ мин} \approx 2 \text{ ч}.$$

Фактический объем леса в секции плота, который можно пропустить из верхнего бьефа в нижний примерно за 2 ч, составляет $1100,5 \text{ м}^3$. Время работы судоподъемника в сутки 22 ч, навигационный период в створе гидроузла с 1 июня по 1 ноября, т.е. 150 суток.

При работе через судоподъемник можно пропускать в течение суток 5 секций плота из верхнего бьефа в нижний и 5 судопропусков из нижнего в верхний.

Таким образом, плот, состоящий из 15 секций, может быть перевезен в камере за трое суток, тогда полный объем лесоматериалов за навигацию будет составлять $16\,507 \times 50 = 825\,350 \text{ м}^3$.

6. Предлагаемые способы повышения пропускной способности судоподъемника КГЭС в связи с пропуском лесоматериалов

1. Пропускная способность судоподъемника Красноярского гидроузла в первую очередь зависит от качества изготовления сортиментных и хлыстовых плотов, т.е. от его полнодревесности. Полнодревесность плота является одной из важнейших транспортных характеристик, отражающих технический уровень, эксплуатационные и экономические показатели. Чем выше будет достигнут коэффициент полнодревесности транспортируемых плотов, тем больше окажется пропускная способность камеры судоподъемника Красноярского гидроузла.

2. Большой резерв времени заключается в малых скоростях ввода и вывода секции плота. Пропускную способность судоподъемника Красноярского гидроузла можно увеличить, если глубина воды в камере окажется на 5–10 см выше, чем при вводе (выводе) секции плота (2,2 м). Это сэкономит время на 4–6 мин в каждом цикле.

3. Пропускную способность судоподъемника можно увеличить за счет повышения скорости равномерного движения камеры. Расчеты сделаны для 30 м/мин, 40 м/мин, вероятно, можно довести ее до 50 м/мин (для этого нужно рассчитать габаритные размеры секции плота по длине).

Вывод

При загрузке судоподъемника Красноярской ГЭС примерно на 100 % транспортировкой лесных материалов при скорости равномерного движения камеры в 40 м/мин за период навигации будет перевезено 825 350 м³ лесных грузов.

Список литературы

1. Сапцин В.П., Турецких С.О. Обоснование строительства судопропускных сооружений на гидроузлах // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 331–340.

2. Сапцин В.П., Турецких С.О. Транспортное сооружение для пропуска лесных грузов на гидроузлах // Научному прогрессу – творчество молодых: тез. докл. междунар. молодежной науч. конф. по естественнонаучным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2011. – С. 231–233.

3. Сапцин В.П. Обоснование габаритных размеров камеры лесосудопропускных сооружений из условия их безаварийной эксплуатации: дис... д-ра техн. наук. – Новосибирск, 1999. – 276 с.

4. Атавин А.А., Яненко А.П. О колебаниях уровня воды при выводе судна из камеры судопропускного сооружения // В сб.: Динамика сплошной среды XX в. Нестационарные проблемы гидродинамики. – Новосибирск, 1977. – С. 35–52.

5. Атавин А.А., Васильев О.Ф., Сапцин В.П. Исследование гидродинамических процессов, возникающих при работе наклонного судоподъемника Красноярского гидроузла // Тр. Гидропроекта. – М., 1978. – № 62. – С. 100–132.

6. Атавин А.А., Васильев О.Ф., Яненко А.П. Гидравлические расчеты судопропускных сооружений. – Новосибирск, 1986. – 81 с.

7. Гулидов С.В. Условия отстоя плотов в шлюзах с головной системой питания // Тр. ЛТА. – Л., 1957. – Вып. 77. – С. 71–86.

8. Донской И.П., Савельев В.В. Водный транспорт леса. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 288 с.

9. Пятякин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 336 с.

10. Солодухин М.М., Овчинников М.М. Водный транспорт хлыстов. – М.: Лесная промышленность, 1986. – 144 с.

11. Харитонов В.Я. Экологические проблемы лесосплава // Лесной журнал. – 1989. – № 6. – С. 53–55.
12. Онипченко Г.Ф. Анализ условий пропуска судов через Красноярский судоподъемник // Гидравлика водосбросных и водопропускных сооружений гидроузлов: сб. науч. тр. Гидропроекта. – М., 1988. – Вып. 132. – С. 71–76.
13. Сапцин В.П. О выборе габаритных размеров камеры наклонного судоподъемника // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1968. – № 1. – С. 117–124.
14. Шелеметев В. За оптимальные размеры плотов // Речной транспорт. – 1989. – № 4. – С. 40–41.

References

1. Saptsin V.P., Turetskikh S.O. Obosnovanie stroitel'stva sudopropusknykh sooruzhenii na gidrouzлах [Justification of the building of navigation openings for waterworks]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse"*. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, pp. 331-340.
2. Saptsin V.P., Turetskikh S.O. Transportnoe sooruzhenie dlia propuska lesnykh грузов na gidrouzлах [Traffic construction for the passage of timber cargo on waterworks]. *Tezisy dokladov mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii po estestvennonauchnym i tekhnicheskim distsiplinam "Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodyh"*. Joshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011, pp. 231-233.
3. Saptsin V.P. Obosnovanie gabaritnykh razmerov kamery lesosudopropusknykh sooruzhenii iz usloviia ikh bezavariinnoi ekspluatatsvii [Justification overall dimensions forest-cameras navigation openings of the conditions of their safe operation]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Novosibirsk, 1999. 276 p.
4. Atavin A.A., Ianenko A.P. O kolebaniiax urovnia vody pri vyvode sudna iz kamery sudopropuskного sooruzheniia [About the fluctuations in the water level in the derivation of the ship from the camera of the navigation pass facility]. *Dinamika sploshnoi sredy XX veka. Nestatsionarnye problemy gidrodinamiki*. Novosibirsk, 1977, pp. 35-52.
5. Atavin A.A., Vasil'ev O.F., Saptsin V.P. Issledovanie gidrodinamicheskikh protsessov, vznikaiushhikh pri rabote naklonного sudopod'emnika Krasnoiarskogo gidrouzла [Hydrodynamic processes that

arise when the inclined lift of the Krasnoyarsk hydroelectric complex]. *Trudu Gidroproekta*. Moscow, 1978, no. 62, pp. 100-132.

6. Atavin A.A., Vasil'ev O.F., Ianenko A.P. *Gidravlicheskie raschety sudopropusknykh sooruzhenii* [Hydraulic calculations of structures]. Novosibirsk, 1986. 81 p.

7. Gulidov S.V. *Usloviia otstoia plotov v shliuzah s golovnoi sistemoi pitaniia* [Conditions of the sludge rafts in gateways with the main system power]. *Trudy Lesotekhnicheskoi akademii*, 1957, no. 77, pp. 71-86.

8. Donskoi I.P., Savel'ev V.V. *Vodnyi transport lesa* [Water transport of the forest]. Moscow: Lesnaia promyshlennost', 1973. 288 p.

9. Patiakin V.I., Dmitriev Iu.Ia., Zaitsev A.A. *Vodnyi transport lesa* [Water transport of the forest]. Moscow: Lesnaia promyshlennost', 1985. 336 p.

10. Solodukhin M.M., Ovchinnikov M.M. *Vodnyi transport khlystov* [Water transport of the whips]. Moscow: Lesnaia promyshlennost', 1986. 144 p.

11. Haritonov V.Ia. *Ekologicheskie problemy lesosplava* [Environmental problems of the rafting]. *Lesnoi zhurnal*, 1989, no. 6, pp. 53-55.

12. Onipchenko G.F. *Analiz uslovii propuska sudov cherez Krasnoiarskii sudopod"emnik* [Analysis of the conditions of the passage of ships through Krasnoyarsk lift]. *Sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta "Gidravlika vodosbrosnykh i vodopropusknykh sooruzhenii gidrouzlov"*. Moscow: 1988, no. 132, pp. 71-76.

13. Sapsin V.P. *O vybore gabaritnykh razmerov kamery naklonnogo sudopod"emnika* [About the choice of the dimensions of the camera of the inclined lift]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo i arhitektura*, 1968, no. 1, pp. 117-124.

14. Shelemetev V. *Za optimal'nye razмеры plotov* [For the optimal size of rafts]. *Rechnoi transport*, 1989, no. 4, pp. 40-41.

Получено 15.05.2015

Об авторах

Сапцин Валерий Петрович (Йошкар-Ола, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение» Поволжского государственного технического университета (424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, e-mail: sapsinvp@mail.ru).

Турецких Светлана Олеговна (Йошкар-Ола, Россия) – аспирант кафедры «Строительные конструкции и водоснабжение» Поволжского государственного технического университета (424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3, e-mail: svetikturckih@mail.ru).

About the authors

Valerii P. Sapsin (Yoshkar Ola, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Building Construction and Water Supply, Volga State University of Technology (3, Lenin sq., Yoshkar Ola, 424000, Russian Federation, e-mail: sapsinvp@mail.ru).

Svetlana O. Turetskikh (Yoshkar Ola, Russian Federation) – Postgraduate student, Department of Building Construction and Water Supply, Volga State University of Technology (3, Lenin sq., Yoshkar Ola, 424000, Russian Federation, e-mail: svetikturckih@mail.ru).