

МОРСКИЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОДНЫЕ ПУТИ, ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ И ПОРТЫ

УДК 626.421.4

А. М. Гапеев,
д-р техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. В. Подрешетникова,
ассистент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РАЗМЕРОВ ВОДОПРОПУСКНЫХ ОТВЕРСТИЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТАМИ ГОЛОВНЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ КАМЕР СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ

ANALYSIS OF THE EXISTING THEORETICAL RESEARCHES TO DETERMINE THE DIMENSIONS OF THE CULVERT OPENINGS FORMED COMPONENTS OF THE HEAD POWER SYSTEMS OF THE SHIPPING LOCK'S CHAMBERS

Приводится краткий анализ существующих теоретических исследований по определению размеров водопропускных отверстий и расположению элементов в головных системах питания камер судоходных шлюзов.

A brief analysis of the existing theoretical researches to determine the dimensions of the culvert openings and positional system components in the head power systems of the shipping lock's chambers.

Ключевые слова: судоходный шлюз, головная система питания, гасительные устройства, наполнение камеры.

Key words: shipping lock, head-end filling, extinguishing devices, lock chamber filling.

ОСНОВНЫМ нормативным документом, определяющим проектирование систем питания судоходных шлюзов, является СНиП 2.06.07-87/1/. В нем определены основные требования к системам питания:

- продолжительность наполнения и опорожнения камеры должна соответствовать заданной судопропускной способности шлюза;
- режимы наполнения и опорожнения должны обеспечивать нормальные условия стоянки судов в камере и работы оборудования, а также нормальные условия стоянки и маневрирования судов в подходных каналах;
- воздействие потока на элементы шлюза, а также на русло и крепление каналов при многократном наполнении и опорожнении камеры не должно вызывать их повреждения;
- конструкции элементов системы питания должны быть доступными для осмотра и ремонта, а также должны обеспечивать быстрое прекращение наполнения (опорожнения) камеры, безопасное для шлюзуемых судов в камере и ожидающих шлюзования на подходах.

Далее в СНиП особое внимание обращается на следующие положения:

- для шлюзов на сверхмагистральных и магистральных водных путях, а также для шлюзов с напорами более 6 м на водных путях местного значения элементы системы питания должны определяться по данным лабораторных и натурных исследований;

— тип системы питания устанавливается по размерам камеры шлюза и расчетного судна при соблюдении условий:

а) при значениях $L_{\text{пк}} H_{\text{к}} < 2000$ и $H_{\text{к}}/h_l < 2$, а также $H_{\text{к}} < 15$ м (где $L_{\text{пк}}$ — полезная длина камеры; $H_{\text{к}}$ — расчетный напор и h_l — глубина на пороге) следует принимать сосредоточенную систему питания, а при $H_{\text{к}} > 15$ м, как правило, распределительную;

б) при расчете головных систем питания продолжительность открытия затворов принимается равной: не более 0,8 продолжительности наполнения и не более 0,6 продолжительности опорожнения камеры;

в) для головных систем питания в целях сокращения времени шлюзования и увеличения пропускной способности шлюзов допускается применять многоскоростные и дифференцированные для различных типов судов и начальных глубин в камере графики открывания затворов галерей.

Таким образом, в СНиП нет конкретных рекомендаций по теоретическому определению размеров водопропускных отверстий, образуемых элементами систем питания.

Теория и методы гидравлического расчета судоходных шлюзов достаточно подробно разработаны для различных типов систем питания и схем истечения жидкости, излагаются в работах многих авторов и в настоящей статье не рассматриваются. Теоретическому определению размеров водопропускных отверстий, образуемых элементами головных систем питания, пока посвящено незначительное число работ.

Большой вклад в изучение проблемы был сделан А. В. Михайловым [2; 3]. Расчет головных систем питания, тип и схемы оборудования которых предварительно выбраны, он разделяет на три отдельные части:

— определение по допускаемым условиям стоянки шлюзуемых судов основных элементов системы питания — *времени и схемы открытия затворов*, а также *площади водопропускных отверстий*;

— построение общей *гидравлической характеристики и определение времени наполнения (опорожнения) камеры шлюза*;

— определение элементов системы гашения энергии потока воды, поступающей в камеру и выходящей из нее, — *общей длины камеры гашения и длины успокоительного участка*.

Основные элементы головных систем питания А. В. Михайлов предлагает определять исходя из соблюдения допускаемых условий стоянки шлюзуемых судов. Соблюдая равенство действующих на суда гидродинамических сил нормативной силе, он получил зависимость для определения величины минимально допустимого времени наполнения камеры ($T_{\text{мин}}^{\text{нап}}$), зависимости для определения площадей водопропускных отверстий затопленных и незатопленных систем питания (ω) и дал рекомендации по схемам открытия затворов.

Значения $T_{\text{мин}}^{\text{нап}}$ и ω получены в предположении равномерного открытия затворов водопропускных отверстий как наиболее простой схемы для работы оборудования и эксплуатации шлюзов. Если схема равномерного открытия затворов не обеспечивает заданного времени наполнения камеры, то в этом случае рекомендуется использовать другие схемы: неравномерную или многоскоростную.

Дальнейшие исследования, посвященные определению площади водопропускных отверстий [4, с. 93–101], показывают, что они должны определяться с учетом обеспечения безопасных условий шлюзования судов не только в камере, но и в подходных каналах шлюзов. Кроме того, для схем питания из-под затворов различной конструкции площадь водопропускных отверстий следует определять не в плоскости подъема затвора по вертикали, а в плоскости, нормальной к очертанию его низа (kozyрька) [5, с. 214–234].

Определение элементов системы гашения энергии потока воды, поступающего в камеру и выходящего из нее, А. В. Михайлов рассматривает в основном с позиций установления только объема камеры гашения и пространства между водопропускными отверстиями и гасителями, определяющих компоновку головы и длину камеры шлюза, существенно влияющих на объемы работ.

«На предварительных стадиях проектирования, когда основной задачей является установление общей схемы сооружения и его стоимости, детали очертания камеры гашения и гасителей (наклон граней, козырька и т. д.) особого значения не имеют» [2, с. 155].

Главной задачей гасительных устройств в этом случае является обеспечение спокойного впуска воды в камеру и равномерного распределения скоростей течения по поперечному сечению камеры перед шлюзуемыми судами. Считается также, что основные элементы системы питания в целом и время наполнения (опорожнения) камеры определяются условиями стоянки наибольших по размерам и водоизмещению шлюзуемых судов, а степень гашения и наибольшая допускаемая неравномерность распределения скоростей по глубине потока — в основном условиями стоянки мелких судов в конце успокоительного участка.

Последнее обстоятельство объясняется тем, что мелкие суда имеют малое отношение миделевого сечения \otimes к начальной площади живого сечения камеры $\Omega_{\text{н}}$ и для них волновая составляющая гидродинамической силы будет невелика по сравнению с силами трения и местной составляющей, которые также считаются незначительными по величине.

Поэтому мелкие суда могут располагаться значительной частью своего корпуса в зоне распространения вихрей и повышенных или пониженных скоростей потока за гасителями.

С этим утверждением нельзя согласиться, поскольку неравномерность распределения скоростей по глубине потока в действительности при неэффективно работающих гасительных устройствах может захватывать не только успокоительный участок, но и значительную часть длины камеры шлюза. На Саратовских шлюзах и шлюзах Волго-Балта, например, этот участок составляет около 1/3 длины камеры [6, с. 135–147]. Кроме того, шлюзование крупнотоннажных судов и составов, число которых на водных путях увеличивается, в ряде случаев осуществляется при больших отношениях $\otimes/\Omega_{\text{н}}$, иногда достигающих 0,9 [7, с. 130–136], и при их расположении в непосредственной близости от успокоительного участка силы сопротивления и силы, вызванные местными явлениями, могут быть сопоставимы с волновой составляющей гидродинамической силы.

Устройства для гашения энергии в камерах шлюзов с головными системами питания А. В. Михайлов условно разделил на два основных элемента:

— камеру гашения, под которой подразумевается все пространство между водопропускными отверстиями и гасителями;

— расположенный за гасителями успокоительный участок камеры, имеющий нормальные судоходные габариты, но не входящий в полезную длину камеры.

Экспериментально было установлено, что размеры камер гашения в головах шлюзов зависят от циркуляции в них вихревых вальцов, образующихся при тех или иных конструкциях и очертаниях гасителей, а длина успокоительных участков — от доли энергии потока, оставшейся непогашенной в камере гашения, и характера выпуска воды в камеру шлюза.

В связи с этим в качестве показателя эффективности работы гасительных устройств введено понятие удельного гашения энергии потока ($\mathcal{E}_{\text{уд}}$, кВт/м²) и высказано предположение, что при изменении на рассматриваемом типе гасительных устройств исходных данных по шлюзу доли энергии потока, гасящиеся в камере гашения и в пределах успокоительного участка, остаются постоянными. В этом предположении удельная энергия потока может быть отнесена отдельно к объему камеры и отдельно к объему успокоительного участка. Было установлено также, что значительная часть энергии потока гасится в камере гашения, а в успокоительные участки переходит не более 3–5 % полной мощности потока воды, поступающей в камеру шлюза.

Исходя из этих данных, А. В. Михайлов предлагает определять объемы камеры гашения при любой схеме открытия водопропускных отверстий по формуле

$$V = A \cdot \mathcal{E}_{\text{макс}}, \text{ м}^3, \quad (1)$$

где A — коэффициент, зависящий от совершенства гасительных устройств, принимаемый равным $0,20 \div 0,25$; $\mathcal{E}_{\text{макс}}$ — наибольшая мощность поступающего в камеру потока воды, определяемая из гидравлической характеристик построением кривой $\mathcal{E}_t = f(t)$:

$$\mathcal{E}_t = g \cdot Q_t \cdot H_t, \text{ кВт.} \quad (2)$$

Длина успокоительного участка определяется выражением

$$l_y = A \cdot \mathcal{E}_{\text{уд.макс}}, \text{ м} \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{уд.макс}}$ — наибольшее значение удельной мощности поступающего в камеру потока воды, отнесенного к живому поперечному сечению успокоительного участка, которое определяется из гидравлической характеристики построением кривой $\mathcal{E}_{\text{уд.т}} = f(t)$:

$$\mathcal{E}_{\text{уд.т}} = \frac{\mathcal{E}_t}{B_{\text{пк}}(h_k + y_t)}, \text{ кВт/м}^2, \quad (4)$$

здесь h_k — глубина воды в камере шлюза при уровне нижнего бьефа, а y_t — изменение уровня воды в момент времени t .

Используя результаты гидравлических исследований, были даны конкретные рекомендации по определению объемов камер гашения и успокоительных участков при равномерном открытии затворов для отдельных типов систем питания с несовершенными гасительными устройствами: систем наполнения камер через отверстия в воротах (клинкеты) с одним балочным гасителем и с наполнением из-под сегментных ворот (шлюзы канала им. Москвы), имеющие большие объемы камер гашения, закрытых сверху, также с одним балочным гасителем.

Полученные в работах [2; 3] результаты исследований считаются приближенными, могут быть использованы на предварительной стадии проектирования судоходных шлюзов и не содержат рекомендаций по определению очертаний и взаимного расположения основных элементов систем питания.

А. В. Михайлов уделил должное внимание и проектированию головных систем питания с короткими обходными галереями, но, в отличие от ранее рассмотренных, он ограничился определением площади водопроводной галереи в расчетном сечении, анализом выполненных работ инженерами Н. Б. Городенским и Г. В. Эндлер и рекомендациями общего характера.

В работе [8, с. 36] даны рекомендации по очертанию входных и выходных отверстий водопроводных галерей, радиусам их осевых закруглений, установке вертикальных балочных гасителей на вогнутых гранях выходных галерей, способствующих равномерному распределению скоростей в поперечных сечениях, и другие, обоснованные результатами лабораторных исследований.

Высказано предположение [2, с. 24–26], что из-за неэффективности работы балочных гасителей на вогнутых гранях выходных галерей, в особенности при больших расходах воды, в нижнем подходном канале могут наблюдаться значительные скорости, вызывающие размыв дна. В связи с этим предлагается выходные галереи заглублять ниже отметки порога, образовавшиеся траншеи перекрывать горизонтальной балочной решеткой, а непосредственно за головой устраивать направляющие пирсы, обеспечивающие более равномерное распределение скоростей по поперечному сечению подходного канала. Предлагается также на верхних головах шлюзов в месте расположения рабочих затворов устраивать клинообразные сечения галерей с целью уменьшения интенсивности поступающего расхода на начальной стадии наполнения камеры.

Широкое применение в дальнейшем получили системы наполнения камер судоходных шлюзов с незатопленными водопропускными отверстиями с затворами различной конструкции и более эффективными гасительными устройствами. В верхних головах этих шлюзов стали использовать пороги различной формы и очертания низа затворов, корытообразные экраны, стенки падения, выступы на стенках падения, экранах и днищах голов, гасительные колодцы, плиты перекрытия над ними, вертикальные распределительные балочные решетки на выходе потока в камеру шлюза и другие элементы. Влияние отдельных элементов гасительных устройств на гидравлические параметры потока выявлялось в процессе лабораторных и натуральных исследований судоходных шлюзов [9, с. 148–155].

Среди первых работ, посвященных теоретическим исследованиям эффективности использования вертикальной балочной решетки, следует выделить работы П. Р. Хлопенкова [10, с. 27].

Оценивая ее существенное влияние на гашение скоростей при выходе потока в камеру шлюза, он предложил располагать балки решетки с шагом отверстий между ними, увеличивающимся снизу вверх по закону геометрической прогрессии, знаменатель которой находится в пределах 1,21÷1,45. При принятой высоте первого от дна камеры отверстия h_1 , заданном количестве отверстий n и знаменателе геометрической прогрессии ρ , используя формулу для определения суммы n членов геометрической прогрессии:

$$\sum h_o = \frac{h_1(\rho^n - 1)}{(\rho - 1)}, \text{ м}, \quad (5)$$

можно получить выражение для определения n -го члена геометрической прогрессии:

$$h_n = h_1 \rho^{n-1}, \text{ м}. \quad (6)$$

По рекомендациям П. Р. Хлопенкова устроена балочная решетка шлюзов Саратовского гидроузла, для которых было принято шесть отверстий при значении первого отверстия $h_1 = 0,2$ м.

Имеется также работа В. А. Кривошей [11, с. 42–51], посвященная обоснованию выпуклого очертания низа подъемно-опускных ворот верхней головы шлюза типа Волго-Балтийского канала с целью уменьшения величины подъемного усилия ворот. Для решения задачи использована теория плоского потенциального движения идеальной жидкости. Показано, что очертание свободно падающей струи зависит от высоты подъема затвора и угла наклона порога.

Более подробные теоретические исследования по определению водопропускных отверстий, образуемых элементами системы наполнения камер из-под плоских подъемно-опускных ворот (шлюзы Волго-Балта, Волго-Дона, Саратовские и др.), очертаниям отдельных элементов и их взаимному расположению приведены в работе [12, с. 34–40]. В ней, в отличие от работ А. В. Михайлова и других авторов, верхняя голова шлюза условно разделена на четыре основных участка: участки направления, гашения и равномерного распределения потока на балочную решетку, а также успокоительный участок в камере шлюза. Предложена приближенная методика по определению размеров основных элементов системы наполнения камеры, основанная на использовании результатов лабораторных исследований, теории движения турбулентных струй и рекомендаций других авторов [2–4; 10].

Получены выражения для определения длины участка гашения потока l_k , расположенного между стенкой падения и экраном, высоты водопропускного отверстия под экраном h_3 , длины участка распределения потока l_p (от внутренней грани экрана до балочной решетки) и длины успокоительного участка в камере шлюза l_y [12].

Балки распределительной решетки рекомендуется располагать с неравномерным шагом отверстий между ними по высоте, увеличивающимся снизу вверх, но, в отличие от работы [10], с учетом изменения потерь энергии в каждом отверстии φ_{oi} и конкретного угла распределения потока β_i :

$$h_i = \varphi_{oi} h_{cp} (1 + \text{tg}^2 \beta_i), \text{ м}, \quad (7)$$

где h_{cp} — средняя высота отверстий в предположении равномерного расположения балок.

Высоту первого от дна камеры отверстия по условиям незасорения топкой древесиной рекомендуется принимать равной 0,4 м.

Результаты выполненных исследований внедрены при проектировании второй нитки шлюза Шекснинского гидроузла.

Даны также рекомендации по обоснованию системы наполнения камеры низконапорного шлюза с использованием клапанного затвора, реализованные при строительстве нового шлюза «Дубой» на Днепро-Бугском канале [13, с. 84–95].

По другим разновидностям головных систем питания судоходных шлюзов теоретических исследований не проводилось. Обоснование систем питания судоходных шлюзов России производилось в основном по результатам лабораторных исследований, иногда без учета кинематических

параметров потока и изменений структуры флота в перспективе, поэтому в условиях существенного увеличения водоизмещения судов многие шлюзы нуждаются в реконструкции и совершенствовании работы. Кроме того, отсутствует единый критерий по оценке качества используемых систем питания судоходных шлюзов.

Список литературы

1. СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. — М.: Госстрой СССР, 1987. — 35 с.
2. Михайлов А. В. Головные системы питания судоходных шлюзов и их расчет / А. В. Михайлов. — М.: Минречфлот СССР, 1951. — 172 с.
3. Михайлов А. В. Судоходные шлюзы / А. В. Михайлов. — М.: Транспорт, 1966. — 528 с.
4. Кононов В. В. Определение размеров водопропускных отверстий судоходных шлюзов с головной системой питания / В. В. Кононов // Проектирование и техническая эксплуатация судоходных сооружений и подходов к ним. — Л.: ЛИВТ, 1984.
5. Гапеев А. М. О гидравлическом расчете наполнения судоходных шлюзов с незатопленными водопропускными отверстиями / А. М. Гапеев, В. В. Кононов // Водные пути и гидротехнические сооружения. — СПб.: СПГУВК, 1999. — Ч. I.
6. Баланин В. В. К вопросу о влиянии переменных значений коэффициентов количества движения и кинетической энергии на гидравлические условия в камерах шлюзов с головной системой питания, наполняемых из-под затвора / В. В. Баланин, В. А. Раев // Улучшение судоходных условий на реках и повышение эксплуатационных качеств судоходных и портовых ГТС. — Л.: ЛИВТ, 1986.
7. Кононов В. В. Выбор оптимальных режимов наполнения нижних шлюзов Горьковского гидроузла и внедрение многопрограммного управления / В. В. Кононов // Технический прогресс в проектировании и эксплуатации водных путей и гидротехнических сооружений. — Л.: ЛИВТ, 1983. — Вып. 176.
8. Городенский Н. Б. Проектирование головных систем питания судоходных шлюзов на основе опыта гидравлических лабораторных исследований: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. Б. Городенский. — Л.: ЛПИ им. М. И. Калинина, 1955.
9. Гапеев А. М. Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А. М. Гапеев // Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства. — Л.: ЛИВТ, 1984.
10. Хлопенков П. Р. Исследования некоторых схем головного наполнения судоходных шлюзов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / П. Р. Хлопенков. — М.: ЛИСИ, 1966.
11. Кривошей В. А. Исследования кинематики потока при истечении из-под ворот шлюза с головной системой питания / В. А. Кривошей // Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства. — Л.: ЛИВТ, 1984.
12. Гапеев А. М. Определение размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер судоходных шлюзов из-под плоских подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев // Журнал Университета водных коммуникаций. — СПб.: СПГУВК, 2012. — Вып. 2 (14).
13. Гапеев А. М. Обоснование системы наполнения камеры судоходного шлюза «Дубой» Днепро-Бугского канала / А. М. Гапеев, Г. Г. Рябов. — СПб.: СПГУВК, 2007.