



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

**Кафедра «Гидротехническое и энергетическое
строительство»**

М. И. Богданович

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ
СИСТЕМ ПИТАНИЯ
СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ**

Методическое пособие

**Минск
БНТУ
2015**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство»

М. И. Богданович

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМ ПИТАНИЯ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ

Методическое пособие
по выполнению курсового проекта
на тему «Судоходный шлюз»
по дисциплинам «Водные пути и порты»,
«Водные пути и технический флот»
для студентов специальности 1-70 04 01
«Водохозяйственное строительство»

Минск
БНТУ
2015

УДК 626.4(076.6)

ББК 39.4я7

Б73

Рецензенты:

зав. кафедрой «Гидравлика и гидравлические машины» БГАТУ,
канд. техн. наук *А. М. Кравцов*;
начальник отдела Водного мониторинга и кадастра РУП ЦНИИКИВР
В. Н. Корнеев

Богданович, М. И.

Б73 Гидравлический расчет систем питания судоходных шлюзов : методическое пособие по выполнению курсового проекта на тему «Судоходный шлюз» по дисциплинам «Водные пути и порты», «Водные пути и технический флот» для студентов специальности 1-70-04 01 «Водохозяйственное строительство» / М. И. Богданович. – Минск : БНТУ, 2015. – 50 с.
ISBN 978-985-550-421-5.

В пособии содержатся пояснения по выполнению раздела курсового проекта на тему «Судоходный шлюз», посвященного гидравлическому расчету системы питания судоходного шлюза.

Даны рекомендации по выбору методики гидравлического расчета системы питания и последовательности его выполнения. Изложены расчетные зависимости, справочные данные для определения параметров, необходимых для расчета, а так же критерии для оценки результатов.

УДК 626.4(076.6)

ББК 39.4я7

ISBN 978-985-550-421-5

© Богданович М. И., 2015

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Студенты специальности 1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство» при выполнении курсового проекта на тему «Судоходный шлюз» сначала конструируют систему питания судоходного шлюза, а потом выполняют ее гидравлический расчет. На этапе конструирования студенты могут использовать ранее изданное пособие [1]. Данное методическое пособие призвано облегчить работу над гидравлическим расчетом. В нем представлены методики расчета, используемые при проектировании судоходных шлюзов [4–11].

В нормативных документах уровня ТКП и СНиП методика гидравлических расчетов систем питания судоходных шлюзов не регламентируется. Однако в ТКП 45-3.04-171–2009 (022550) [2] изложены требования к эксплуатационным показателям систем питания, из которых вытекает необходимость расчета нескольких нормируемых параметров: продолжительность наполнения и опорожнения камеры шлюза; величины продольных и поперечных составляющих гидродинамических сил, действующих в процессе шлюзования на стоящие в камере или у причала суда; значения продольных и поперечных скоростей течения в подходных каналах, а также относительное время открытия затворов на водопроводных отверстиях системы питания.

Определение этих величин основывается на интегрировании дифференциальных уравнений неустановившегося движения воды, описывающих процесс наполнения и опорожнения камеры шлюза. Используемые при этом гипотезы, преобразования и численные методы позволяют получить результаты с той или иной степенью достоверности. Поэтому в [2] имеется указание на необходимость уточнения параметров системы питания по данным лабораторных и натурных исследований для шлюзов на сверхмагистральных и магистральных водных путях, а также для шлюзов с напорами более 6 м на путях местного значения.

При гидравлических расчетах систем питания шлюзов [3–11] используются методики, основанные на результатах приближенного решения одномерного уравнения неустановившегося движения воды. При этом последовательность расчета зависит от типа системы питания, конструкции водопроводного тракта, принятых допущений относительно изменения коэффициента расхода в процессе наполнения и опорожнения камеры шлюза, а также критериев оценки результатов расчета. Так, например, в методиках, изложенных в [3–8], значение коэффициента расхода системы питания через затопленные в начале наполнения отверстия принимается неизменяемым, тогда как в [9–11] оно изменяется на каждом шаге расчета. В данном пособии излагаются сведения, позволяющие студентам в рамках отведенного учебным планом времени, изучить основные принципы гидравлических расчетов систем питания судоходных шлюзов, выбрать необходимую методику для гидравлического расчета систем питания, получить справочные данные для расчета и критерии оценки их результатов.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ШЛЮЗА

Цель гидравлического расчета – оценка правильности параметров системы питания, принятых при ее конструировании. Критериями оценки являются величины, нормируемые в [2]. Основная из них – продольная составляющая гидродинамической силы, действующая на судно в камере шлюза и в подходных каналах при шлюзовании и определяемая в процессе гидравлического расчета. Она не должна превышать допустимого значения, изложенного в [2] и вычисляемого по формуле:

$$F_l = 1,4\sqrt[3]{D}, \text{ кН}, \quad (1)$$

где D – водоизмещение расчетного судна или наибольшего грузового судна в расчетном составе в полном грузу, кН.

Другие нормируемые в ТКП [2] величины, определяемые расчетом, косвенно свидетельствуют о соблюдении нормативных условий отстоя судов. Это время наполнения и опорожнения камеры шлюза t ; продольные скорости в подходных каналах v_f ; относительное время подъема затворов на водопроводных трактах системы питания k_3 ; наибольший инерционный подъем (спад) уровня воды Δ_n при наполнении (опорожнении) камеры шлюза с распределительной системой питания. Их величины должны быть следующими [2]. Время наполнения и опорожнения камеры шлюза в минутах при предварительных расчетах не должно быть меньше определяемого по формуле

$$t = \alpha\sqrt[3]{H_d b_{c,ef} l_{c,ef}}, \text{ мин}, \quad (2)$$

где $\alpha = 0,27$ – для шлюзов с сосредоточенной (головной) системой питания, $\alpha = 0,19$ – с распределительной системой питания;

H_d – расчетный напор на камеру, м;
 $b_{c,ef}$ – полезная ширина камеры, м;
 $l_{c,ef}$ – полезная длина камеры, м.
Скорость v_f должна соответствовать неравенству:

$$v_f \leq 0,8 \text{ м/с.} \quad (3)$$

Относительное время, вычисляемое по зависимости:

$$k_3 = t_3/t,$$

где t_3 – время подъема затвора должно быть:

при наполнении камер шлюзов с сосредоточенной системой питания

$$k_3 \leq 0,8; \quad (4)$$

с распределительной системой питания

$$k_3 \leq 0,6; \quad (5)$$

при опорожнении с любыми системами питания

$$k_3 \leq 0,6; \quad (6)$$

наибольший инерционный подъем (спад) уровня

$$\Delta_n \leq 0,25 \text{ м.} \quad (7)$$

В рамках курсового проекта в основном используются конструкции систем питания, представленные в [1]. В зависимости от водопроводного тракта и затвора перекрывающего его наполнение камеры может происходить через затопленные или через незатопленные в начале наполнения отверстия. Опорожнение камеры [1] осуществляют только через затопленные отверстия.

К системам наполнения с незатопленными отверстиями относятся системы с плоскими и сегментными подъемно-опускными воротами, с затопленными отверстиями – системы с клинкетами в плоских двухстворчатых воротах, с полноповоротными сегментными воротами, с короткими обходными галереями и галереями в стенах и (или) днище камеры шлюза.

1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ ШЛЮЗА ЧЕРЕЗ НЕЗАТОПЛЕННЫЕ В НАЧАЛЕ НАПОЛНЕНИЯ ОТВЕРСТИЯ

В этом случае затвором водопроводного тракта являются рабочие ворота верхней головы. По мере наполнения камеры происходит изменения условий истечения через отверстие под воротами: в начале – свободное истечение в атмосферу, в конце – затопленное истечение. Существует несколько методик гидравлического расчета наполнения камеры, применяемых в таком случае [3–8]. Различие методик состоит в использовании разных критериев оценки результатов расчетов из нормируемых (1–4) и, соответственно, в составе искомых параметров. В курсовом проекте целесообразно принять за основу методику, изложенную в [7], однако в качестве оценочного критерия принять не критерий по выражению (4), а критерий (1), соответствующим образом изменив и дополнив расчет.

Процесс наполнения камеры через отверстие под плоскими подъемно-опускными или сегментными воротами в соответствии с условиями истечения разбивается на четыре периода [7, 9] (рис. 1.1).

Первый период – поступление воды в камеру через незатопленное отверстие, так как оно находится выше уровня воды в камере. Он продолжается от момента начала наполнения до момента времени, когда уровень воды в камере (УВК) поднимется до отметки порога верхней головы.

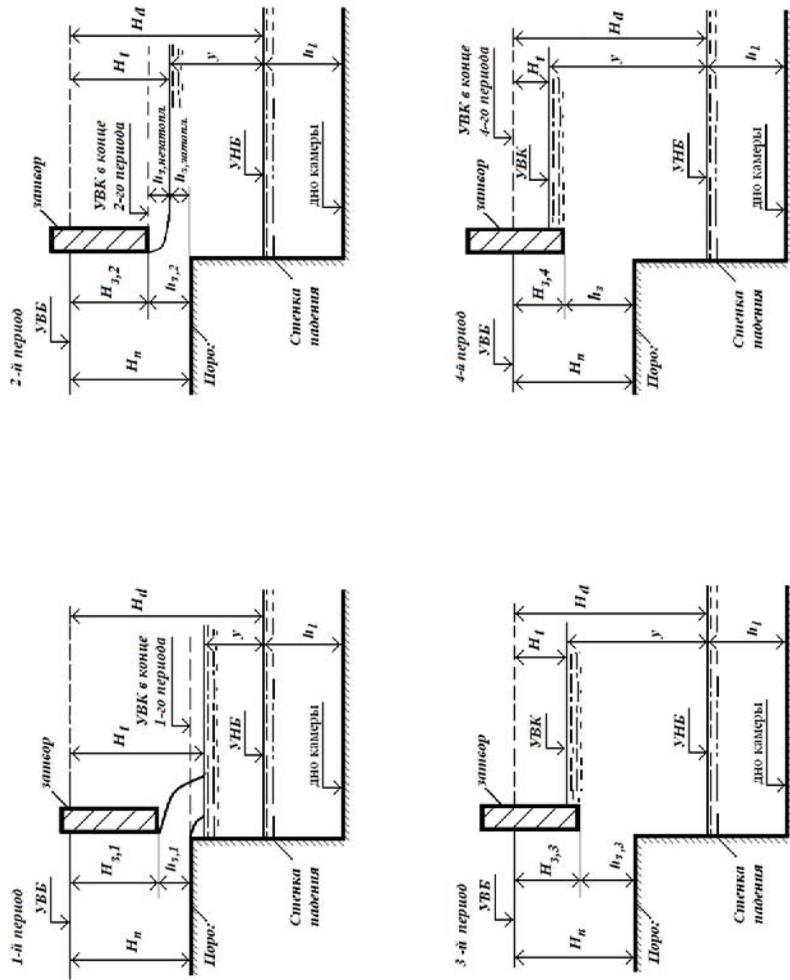


Рис. 1.1. Расчетные схемы наполнения камеры через незатопленное водопропускное отверстие под затвором

Второй период – поступление воды в камеру через затопленное отверстие, так как часть отверстия высотой $h_{3, \text{затопл}} = H_n - H_t$ является затопленной уровнем воды в камере, а часть отверстия, высотой $h_{3, \text{незатопл}} = H_t - H_{3,2}$ является незатопленной; здесь $H_{3,2}$ – напор над нижней кромкой затвора, H_n – напор на пороге головы при \downarrow НПУ, H_t – напор на шлюз в момент времени t . Второй период продолжается от момента достижения УВК отметки порога верхней головы до момента времени, когда он поднимется до нижней кромки затвора.

Третий период – поступление воды в камеру через затопленное отверстие переменной площади, так как затвор еще поднимается. Третий период продолжается от момента достижения уровнем воды в камере нижней кромки затвора до момента остановки затвора. В конце периода высота поднятия затвора $h_{3,3}$ достигает полной высоты h_3 .

Четвертый период – поступление воды в камеру через затопленное отверстие постоянной площади, так как затвор поднят на полную высоту h_3 и неподвижен. Четвертый период продолжается от момента остановки затвора до момента наполнения камеры, когда уровень воды в ней сравнивается с уровнем верхнего бьефа и напор становится равным нулю.

Гидравлический расчет наполнения ведется по периодам [7]. Предварительно определяется скорость подъема затвора u_3 по зависимости

$$u_3 = \frac{\sqrt{g}(\omega_k - \chi)F_l}{\mu_0 b_{c,ef} \sqrt{2H_n D}}, \quad (1.1)$$

где $\omega_k = b_{c,ef} h_l$ – площадь живого сечения камеры при \downarrow МУНБ, м²;

χ – площадь миделевого сечения расчетного судна, м²;

$F_l = 1,4 \cdot \sqrt[3]{D}$ – допустимая продольная составляющая гидродинамической силы, действующая на судно при шлюзовании, кН;

$\mu_0 = 0,6 - 0,62$ – коэффициент расхода для безгалерейных систем питания [5];

D – водоизмещение расчетного судна или наибольшего грузового судна в расчетном составе в полном грузу, кН.

Определяется минимально допустимое время наполнения камеры t

$$t = \alpha \cdot \sqrt[3]{H_d l_{c,ef} b_{c,ef}}, \text{ мин,}$$

где $\alpha = 0,27$ – коэффициент для сосредоточенной системы питания шлюза.

При $k_3 = 0,8$ полная высота поднятия затвора $h_3 = u_3 k_3 t$. Далее расчет ведется по периодам.

Первый период: истечение из-под ворот в атмосферу (см. рис. 1).

Определяются в конце периода расход Q_1 и величина заглубления $H_{3,1}$ нижней кромки затвора под $\downarrow УВБ$ из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{Q_0 + Q_1}{2} \left(\frac{H_n - H_{3,1}}{u_3} \right) = \Omega y_1; \\ Q_1 = \frac{2}{3} \mu_0 b_{c,ef} \sqrt{2g} (H_n^{1,5} - H_{3,1}^{1,5}), \end{cases} \quad (1.2)$$

где $Q_0 = 0$ – расход в начале первого периода;

Q_1 – расход, поступающий в камеру в конце первого периода;

$H_{3,1}$ – заглубление нижней кромки затвора под $\downarrow УВБ$ в конце 1-го периода;

$y_1 = \downarrow$ порога ВБ – \downarrow МУНБ – слой воды, поступивший в камеру за первый период;

Ω – площадь зеркала камеры.

Система уравнений решается подбором относительно $H_{3,1}$ и Q_1 , для чего из первого уравнения выражается Q_1 , и подставляется во второе уравнение. В полученном выражении в правой и левой частях имеется неизвестное $H_{3,1}$. Задавая его численными значениями и подставляя их в правую и левую части находят значение, при котором выражение обращается в равенство. Полученное значение $H_{3,1}$ используется для вычисления Q_1 по одному из уравнений системы (1.2).

Определяется продолжительность первого периода наполнения Δt_1 :

$$\Delta t_1 = \frac{H_n - H_{3,1}}{u_3}. \quad (1.3)$$

Второй период: истечение через полузатопленное отверстие.

Определяются расход Q_2 и величина $H_{3,2}$ заглубления затвора под \downarrow УВБ в конце периода из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{Q_1 + Q_2}{2} \left(\frac{H_{3,1} - H_{3,2}}{u_3} \right) = \Omega(H_n - H_{3,2}); \\ Q_2 = \mu_0 b_{c,ef} \sqrt{2gH_2} (H_n - H_{3,2}), \end{cases} \quad (1.4)$$

где Q_2 – расход, поступающий в камеру в конце второго периода;

$H_{3,2}$ – заглубление нижней кромки затвора под \downarrow УВБ в конце 2-го периода;

H_2 – напор над центром отверстия в конце второго периода, определяемый по формуле $H_2 = H_n - 0,5(H_n - H_{3,2})$.

Система (1.4) решается подбором относительно $H_{3,2}$ и Q_2 . При этом из возможных решений системы принимаются те, которые не противоречат физическому смыслу процесса.

Определяется продолжительность второго периода наполнения Δt_2 :

$$\Delta t_2 = \frac{H_{3,1} - H_{3,2}}{u_3}, \text{ с.} \quad (1.5)$$

Третий период: наполнение через затопленное отверстие переменной площади.

Определяется продолжительность третьего периода

$$\Delta t_3 = \frac{h_3 - (H_n - H_{3,2})}{u_3}, \text{ с.} \quad (1.6)$$

Четвертый период: истечение из-под затопленного отверстия постоянной площади.

Определяется продолжительность четвертого периода Δt_4

$$\Delta t_4 = \frac{2\Omega\sqrt{H_{3,4}}}{\mu_0 b_c e f h_3 \sqrt{2g}}, \text{ с.} \quad (1.7)$$

где $H_{3,4} = H_n - h_3$ – заглубление затвора под \downarrow НПУ в конце третьего и в четвертом периоде.

Полное время наполнения T

$$T = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4, \text{ с.} \quad (1.8)$$

Если $T < t$, то уменьшается скорость подъема ворот и расчет повторяется.

Определяется величина k_3

$$k_3 = \frac{t_3}{T} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3}{T}. \quad (1.9)$$

Если k_3 не соответствует условию (4), то уменьшается высота поднятия затвора и учитывается это в третьем периоде.

Производится проверка условий стоянки расчетного судна (состава) в процессе наполнения камеры путем определения величины первого пика волновой составляющей гидродинамической силы P_1 . Величина силы определяется по приближенной формуле А. В. Михайлова [5]:

$$P_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{D}{g \cdot (\omega_k - \chi)}, \text{ кН}, \quad (1.10)$$

где ω_k – площадь поперечного сечения камеры при \downarrow МУНБ;

χ – площадь миделевого сечения расчетного судна;

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ – приращение расхода воды по времени при первом

пробеге волны наполнения в камере; приближенно можно принять по [5]

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \left(\frac{dQ}{dt} \right)_0 = \frac{4\Omega H_d}{T^2 k_3 (2 - k_3)}.$$

После определения P_1 проверяется выполнение условия $P_1 \leq F_l$, что свидетельствует об обеспечении нормативных условий стоянки расчетного судна (состава) при наполнении. Если это условие не выполняется, необходимо изменить скорость подъема затвора и повторить расчет.

Особенностью гидравлического расчета шлюза с наполнением через незатопленное вначале отверстие является то, что в зависимости от напора, размеров шлюза и судна, скорости и высоты подъема затвора некоторые промежутки могут отсутствовать.

Например, при большой скорости подъема затвора он может остановиться во втором периоде. С момента остановки затвора расчеты производятся при постоянных значениях высоты и площади водопропускного отверстия. Третий период в этом случае отсутствует.

При малой скорости подъема затвора наполнение камеры может закончиться раньше подъема затвора на полную высоту. В этом случае будет отсутствовать четвертый период.

2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ ШЛЮЗА ЧЕРЕЗ ЗАТОПЛЕННОЕ В НАЧАЛЕ НАПОЛНЕНИЯ ОТВЕРСТИЕ

Методика расчета основана на положениях, представленных в основном в [5, 8, 9 – 11], и применяется при гидравлическом расчете наполнения камеры через короткие обходные галереи, галереи в стенах и днище камеры шлюза, а также через отверстие под полноповоротными сегментными воротами и клинкетные отверстия в плоских двухстворчатых воротах.

Процесс наполнения камеры состоит из двух промежутков времени:

первый промежуток – от начала наполнения камеры до момента остановки затворов t_3 ; в этом промежутке происходит подъем затворов и изменяются их коэффициенты сопротивления, а следовательно и коэффициент расхода системы питания μ_t .

второй промежуток – от момента остановки затворов до момента времени, когда уровень воды в камере сравняется с уровнем воды в верхнем бьефе (конец наполнения); в этом

промежутке затворы подняты на полную высоту и неподвижны, следовательно, коэффициент расхода системы питания постоянен и равен μ_0 .

Гидравлический расчет выполняется в такой последовательности:

- составляется расчетная схема по запроектированной системе питания;
- уточняется коэффициент расхода системы наполнения при полностью поднятом затворе;
- выполняется расчет гидравлических характеристик для первого и второго периодов наполнения;
- выполняется оценка параметров запроектированной системы наполнения с точки зрения нормативных условий отстоя судов в камере шлюза и подходных каналах.

2.1. Составление расчетной схемы

Для систем наполнения через отверстие под полноповоротными сегментными воротами и клинкетные отверстия наполнение происходит через водопроводный тракт, длина которого равна толщине затвора, или двухстворчатых ворот, где расположены клинкетные отверстия. Поэтому вычерчивать схему нет необходимости.

При расчете наполнения через короткие обходных галереи и при распределительных системах питания по запроектированной системе наполнения камеры шлюза составляются расчетные схемы (рис. 2.1, 2.2). Они могут быть вычерчены на отдельном рисунке или оформлены на чертеже системы питания. При этом чертеж должен быть строго в масштабе с представленными размерами, характеризующими водопроводный тракт: обозначены длины всех участков галереи с поперечными сечениями, отличающимися от расчетного, всех поворотов, прямолинейных вставок, участков галерей с выпусками, участков сужения и расширения галереи, показаны значения углов поворота.

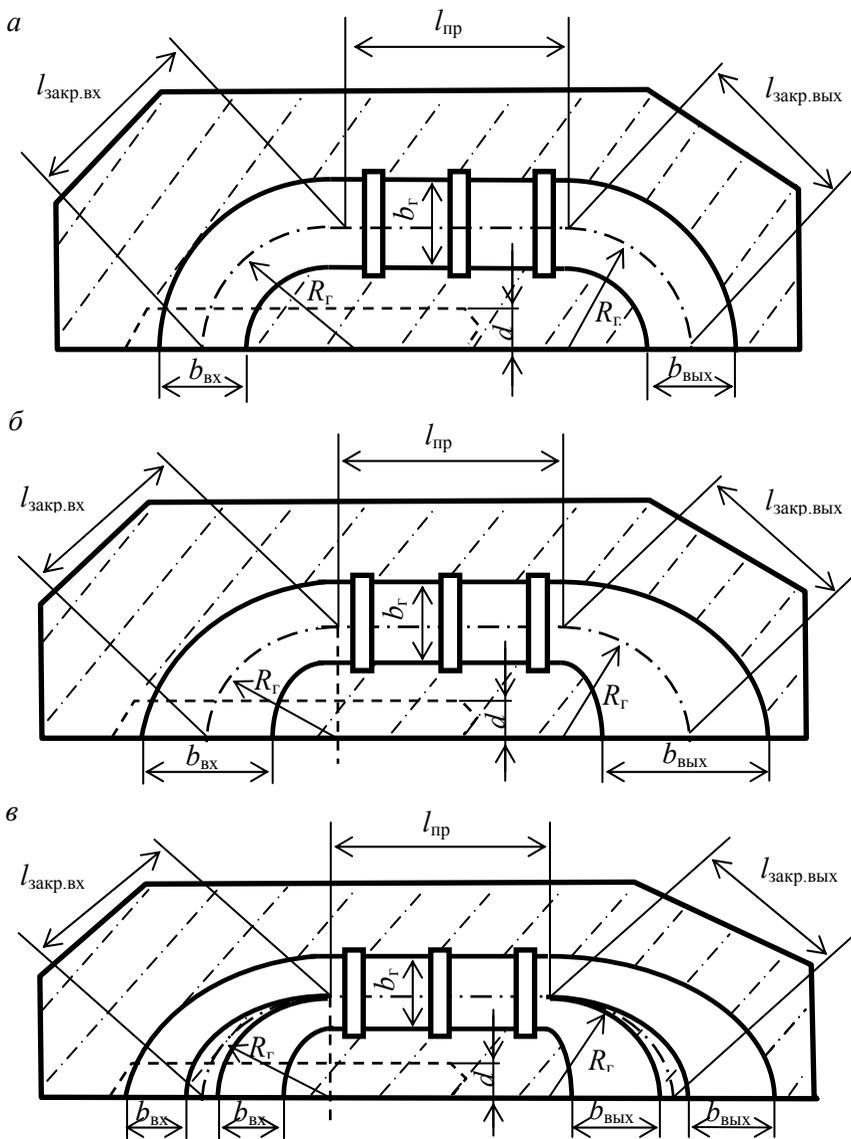


Рис. 2.1. Расчетная схема системы питания с короткими обходными галереями:
a – с площадями входов в галере и выходов из них равными площади расчетного сечения;
б – с уширенными входами;
в – с раздвоенными входами

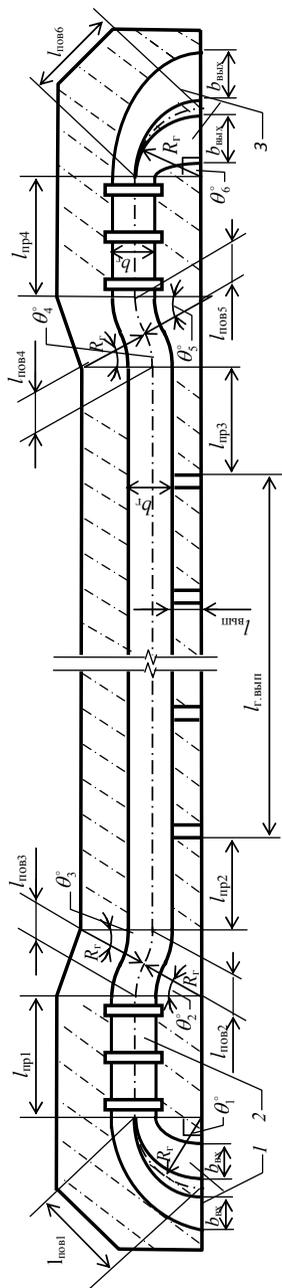


Рис. 2.2. Расчетная схема распределительной системы питания с галереями в стенах камер:

$l_{пр4}$ – $l_{пр4}$ – длины прямолнейных участков водопроводной галереи;

$l_{пов1}$ – $l_{пов6}$ – длины поворотов участков водопроводной галереи; θ_1 – θ_6 – углы поворота галереи;

l – вход галерею; 2 – расчетное сечение галереи; 3 – выход из галереи

2.2. Уточнение коэффициент расхода системы наполнения при полностью поднятом затворе

В каждый момент времени наполнения камеры значение коэффициента расхода системы μ_t вычисляется по формуле

$$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{\xi_3 + \sum \xi_i}}, \quad (2.1)$$

где ξ_3 – коэффициент сопротивления частично открытых затворов;

$\sum \xi_i$ – сумма коэффициентов постоянных гидравлических сопротивлений водопроводного тракта при полностью открытых затворах.

При наполнении через отверстие под полноповоротными сегментными воротами при полностью открытом отверстии в $\sum \xi_i$ включается коэффициент сопротивления на входе в отверстие – $\xi_{вх}$, на выход из него – $\xi_{вых}$ и на пазах ворот – $\xi_{паз}$. При наполнении через клинкерные отверстия добавляются еще и потери напора на деления потока.

При наполнении через короткие обходные галереи или галереи в стенах или днище камеры сумма коэффициентов постоянных сопротивлений $\sum \xi_i$ в общем случае может включать в себя следующие коэффициенты сопротивлений:

а) коэффициент сопротивления на входе потока в систему питания $\xi_{вх}$;

б) коэффициент сопротивления входной сороудерживающей решетки $\xi_{реш}$;

в) сумму коэффициентов сопротивлений всех поворотов от входа потока в систему питания до выхода в камеру $\sum \xi_{пов}$;

г) сумму коэффициентов сопротивлений всех разделений потока на части (если они имеются) $\sum \xi_{\text{разд}}$;

д) сумму коэффициентов сопротивлений по длине $\sum \xi_{\text{дл}}$, определенную по длине галерей от входа до выхода при сосредоточенных системах питания и от входа до начала участка галерей с выпусками при распределительных;

е) коэффициент сопротивления участка галереи с выпусками $\xi_{\text{Г вып}}$;

ж) коэффициент сопротивления при выходе потока из выпусков в камеру $\xi_{\text{вых}}$;

з) коэффициент сопротивления последнего выпуска из галерей в камеру $\xi_{\text{посл вып}}$;

и) сумму коэффициентов сопротивлений всех сужений $\sum \xi_{\text{с}}$ и всех расширений $\sum \xi_{\text{р}}$, имеющих в галереях;

к) сумму коэффициентов сопротивлений пазов ремонтных затворов $\sum \xi_{\text{паз}}$.

Значения коэффициентов сопротивлений принимаются по гидравлическим справочникам или по табл. П.1 приложения [5, 10]. В общем случае, сумма коэффициентов постоянных сопротивлений $\sum \xi_i$ находится по формуле

$$\begin{aligned} \sum_i \xi_i = & \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{реш}} + \sum \xi_{\text{пов}} + \sum \xi_{\text{разд}} + \sum \xi_{\text{дл}} + \\ & + \xi_{\text{Г вып}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{посл вып}} + \sum \xi_{\text{с}} + \sum \xi_{\text{р}} + \sum \xi_{\text{паз}}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Если площадь поперечного сечения галерей переменна по длине (меняется от участка к участку), необходимо взятые по табл. П.1 значения коэффициентов сопротивлений привести к расчетной площади сечения галерей $\omega_{\text{Г}}$. Для этого каждый из коэффициентов сопротивлений ξ_i (если он определен для участка галерей с сечением, отличным от расчетного),

умножается на величину $\left(\frac{\omega_{\Gamma}}{\omega_i}\right)^2$, где ω_i – площадь поперечного сечения i -го участка галереи.

Система питания, расчетная схема которой приведена на рис. 2.1, имеет две водопроводные галереи площадью $\omega_{\Gamma} = \frac{\omega}{2}$ в стенах головы, где ω – суммарная площадь отверстий, через которые наполняется камера шлюза. Каждая галерея содержит входной участок с закругленными кромками, имеющий площадь $\omega_{\text{вх}}$; сороудерживающую решетку на входе, составленную, например, из прямоугольных стержней с закругленными торцами и отношением $\left(\frac{s}{b}\right) = \frac{1}{7} - \frac{1}{10}$; два поворота на 90° в горизонтальной плоскости радиусами R_{Γ} и три паза для плоских затворов, размещенных на прямолинейном участке галереи.

Расчетная схема (см. рис. 2.2) включает при наполнении камеры поворот на 90° в горизонтальной плоскости радиусом R_{Γ} участок, где располагаются три пазы для плоских затворов, и содержит два поворота в горизонтальной плоскости на угол θ° , прямолинейный участок от окончания поворотов до первого выпуска; участок галереи длиной $l_{\Gamma \text{ вып}}$ и площадью ω_{Γ} с $n_{\text{в}}$ выпусками общей площадью $\omega_{\text{вып}}$ и длиной $l_{\text{вып}}$ каждый. При опорожнении расчетная схема включает участок галереи длиной $l_{\Gamma \text{ вып}}$ и площадью ω_{Γ} с $n_{\text{в}}$ выпусками общей площадью $\omega_{\text{вып}}$ и длиной $l_{\text{вып}}$ каждый; прямолинейный участок от последнего выпуска до начала поворотов в горизонтальной плоскости на угол θ° ; участок, где располагаются три паза для плоских затворов, поворот на 90° в горизонтальной плоскости радиусом R_{Γ} .

Тогда для сосредоточенной системы наполнения через короткие обходные галереи (см. рис. 2.1)

$$\sum \xi_i = \xi_{\text{ВХ}} \left(\frac{\omega_{\text{г}}}{\omega_{\text{ВХ}}} \right)^2 + \xi_{\text{РЕШ}} \left(\frac{\omega_{\text{Г}}}{\omega_{\text{ВХ}}} \right)^2 + \sum \xi_{\text{ПАЗ}} +$$

$$+ 2\xi_{\text{ПОВ } 90^\circ} + \xi_{\text{ДЛ}} + \xi_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{\omega_{\text{Г}}}{\omega_{\text{ВЫХ}}} \right)^2$$

для распределительной системы с галереями в стенах при наполнении (см. рис. 2.2)

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = \xi_{\text{ВХ}} \left(\frac{\omega_{\text{Г}}}{\omega_{\text{ВХ}}} \right)^2 + \xi_{\text{РЕШ}} \left(\frac{\omega_{\text{Г}}}{\omega_{\text{ВХ}}} \right)^2 + \sum \xi_{\text{ПАЗ}} +$$

$$+ \sum \xi_{\text{ПОВ } 0^\circ} + \xi_{\text{ДЛ}} + \xi_{\text{Г ВЫП}} + (\xi_{\text{ВЫХ}} + \xi_{\text{ПОСЛ ВЫП}}) \cdot \left(\frac{\omega_{\text{Г}}}{\omega_{\text{ВЫП}}} \right)^2,$$

где $\omega_{\text{ВЫП}}$ – площадь выпусков в галерее;

$\sum \xi_{\text{ПАЗ}}$ – сумма коэффициентов сопротивления в пазовых затворах, которые зависят от типа затворов

$$\sum \xi_{\text{ПАЗ}} = n_{\text{ПАЗ}} \xi_{\text{ПАЗ}},$$

где $n_{\text{ПАЗ}}$ – количество пазов затворов, учитываемое в формуле $n_{\text{ПАЗ}} = 2$, так как сопротивление паза рабочего затвора учитывается в коэффициенте сопротивления полностью поднятого затвора;

$\xi_{\text{ПАЗ}}$ – принятый коэффициент сопротивления одного паза.

$\xi_{\text{ДЛ}}$ – коэффициент сопротивления по длине

$$\xi_{\text{ДЛ}} = \frac{2gl_{\text{Г}}}{C^2 R},$$

где l_{Γ} – длина галереи от входа до выхода при сосредоточенной системе питания (см. рис. 2.1), при распределительной системе вместо l_{Γ} в формулу подставляется длина участка галереи $l_{\Gamma 1}$ от входа до начала участка галереи с выпусками (см. рис. 2.2).

Для сосредоточенной системы наполнения через короткие обходные галереи

$$l_{\Gamma} = l_{\text{закр. вх}} + l_{\text{пр}} + l_{\text{закр. вых}},$$

$$l_{\text{закр. вх}} = \frac{1}{4} \cdot 2\pi R_{\Gamma} - d, \text{ м},$$

где d – глубина шкафной ниши плоских двухстворчатых ворот. При размещении входа в галерею вне шкафной ниши параметр d не учитывается;

$l_{\text{пр}} \geq 2b_{\Gamma}$ – определяется графически по составленной расчетной схеме, м;

$$l_{\text{закр. вых}} = \frac{1}{4} \cdot 2\pi R_{\Gamma}, \text{ м}.$$

C – коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

где n – коэффициент шероховатости для бетона;

$$R = \frac{\omega_{\Gamma}}{\chi_{\Gamma}} - \text{гидравлический радиус галереи, м.}$$

Для распределительной системы с галереями в стенах при наполнении участок длиной $l_{\Gamma 1}$ применительно к рис. 2.2 состоит

$$l_{г1} = \sum_{i=1}^2 l_{пр\ i} + \sum_{i=1}^3 l_{пов\ i},$$

где $l_{пов\ i} = \frac{2\pi R_{г}}{360} \theta_i^{\circ}$, м.

Коэффициент расхода системы при полностью поднятых затворах μ_0 вычисляется по формуле

$$\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi_i}}.$$

2.3. Расчет гидравлических характеристик наполнения камеры шлюза

2.3.1. Расчет характеристик для первого периода наполнения камеры шлюза

Определяется коэффициент сопротивления ξ_3 частично открытых рабочих затворов. Он зависит от типа затвора и степени его открытия $n = \frac{h_3}{h_{зп}}$; здесь h_3 – высота подъема затворов в данный момент; $h_{зп}$ – полная высота подъема затворов. При наполнении камеры через галереи $h_{зп} = h_{г}$, через клинкетные отверстия – их высоте, через полноповоротные сегментные ворота высоте полностью открытого отверстия. В курсовом проекте рекомендуется принять плоские затворы для водопроводных галерей и клинкетных отверстий.

Значение ξ_3 для различных типов затворов приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Коэффициенты сопротивлений частично открытых затворов

Степень открытия затворов $n = \frac{h_3}{h_{3п}}$	Коэффициенты сопротивлений затворов ξ_3					
	плоский	поворотный	вальцовый	цилиндрический	плунжерный	сегментный
1	2	3	4	5	6	7
0	∞	∞	∞	∞	∞	∞
0,1	193,30	–	35500	81,00	570,00	–
0,125	–	142,20	–	–	–	82,30
0,200	44,75	–	1500	23,00	29,00	–
0,250	–	55,20	–	–	–	19,30
0,300	18,05	–	280	8,90	7,00	–
0,375	–	20,20	–	–	–	7,63
0,400	8,37	–	60	4,75	3,15	–
0,500	4,27	7,85	18	3,00	1,60	3,58
0,600	2,33	–	6	2,25	0,93	–
0,625	–	2,88	–	–	–	1,70
0,700	1,10	–	2,3	1,80	0,55	–
0,750	–	1,11	–	–	–	0,81
0,800	0,64	–	0,9	1,55	0,30	–
0,875	–	0,41	–	–	–	0,34
0,900	0,34	–	0,24	1,40	0,16	–
1,000	0,04	0,16	0,0	1,30	0,11	0,17

Так как ξ_3 изменяется по мере подъема затворов, будет изменяться и суммарный коэффициент сопротивления системы питания $\sum \xi$. Поэтому, после определения суммы коэффициентов постоянных сопротивлений $\sum_i \xi_i$, производится расчет $\sum \xi$ по формуле $\sum \xi = \sum \xi_i + \xi_3$ по мере подъема затворов и определяется коэффициент расхода системы питания μ_t по формуле

$$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi}}$$

Расчет $\sum \xi$ и μ_t в зависимости от степени открытия затворов n и высоты их подъема h_3 выполняется в табличной форме (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Расчет суммарного коэффициента сопротивления системы питания и коэффициента расхода

n , степень открытия затворов (по табл. 1)	ξ_3 из табл. 1	$\sum \xi_i$	$\sum \xi = (2) + (3)$	$\mu_t = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi}}$	$h_3 = nh_{3П}$
1	2	3	4	5	6
0	∞	$\sum \xi_i$	$(\sum \xi)_0 = \infty$	0	0
0,1	ξ_{31}		$(\sum \xi)_1 = \xi_{31} + \sum \xi_i$	μ_{t1}	$h_{31} = 0,1h_{3П}$
...
1,0	$\xi_{310} = \xi_{паз}$		$(\sum \xi)_{10} = \xi_{310} + \sum \xi_i$	$\mu_{t10} = \mu_0$	$h_{310} = h_{3П}$

По значениям μ_t , h_3 , ξ_3 , $\sum \xi$ из табл. 2.2 следует построить графики изменения по мере подъема затворов

$$\mu_t = f(h_3), \quad \xi_3 = f(h_3), \quad \sum \xi = f(h_3).$$

Они будут использоваться далее при расчете гидравлических характеристик.

Для систем наполнения через клинкетные отверстия или полноповоротные сегментные ворота графики $\xi_3 = f(h_3)$, $\sum \xi = f(h_3)$ не требуются, так как давление за затвором не рассчитывается, поэтому графики $\mu_t = f(h_3)$, могут быть построены с использованием табл. П.2 приложения, в которых даны значения $\mu' = f(\mu_0, n)$, где $\mu' = \frac{\mu_t}{\mu_0}$, $n = \frac{h_3}{h_{3П}}$. Тогда $\mu_t = \mu' \mu_0$ и $h_3 = nh_{3П}$.

Определяется максимально допустимая постоянная скорость подъема затворов наполнения $u_{з доп}$, при которой первый пик продольной составляющей гидродинамической силы не превысит допустимого значения F_l :

$$u_{з доп} = \frac{g(\omega_k - \chi)F_l}{\left(\frac{d\mu_t}{dh_3}\right)_H \omega \sqrt{2gH_d} D\beta}, \text{ м/с}, \quad (2.3)$$

где $\left(\frac{d\mu_t}{dh_3}\right)_H$ – производная коэффициента расхода μ_t по высоте подъема затворов в начальный период наполнения; приближенно она определяется по графику $\mu_t = f(h_3)$, как отношение соответствующего приращения $\Delta\mu_t$ к Δh_3 :

$$\left(\frac{d\mu_t}{dh_3}\right)_H \cong \left(\frac{\Delta\mu_t}{\Delta h_3}\right)_H.$$

Приращения $\Delta\mu$ и Δh_3 берутся в начальный период подъема затворов;

D – водоизмещение расчетного судна, наибольшего судна в толкаемом или буксируемом составе, кН;

β – коэффициент характеризующий совершенство системы питания, для сосредоточенной системы $\beta = 1$, для простой распределительной $\beta = 0,4$.

Определяется время подъема затворов t_3 на полную высоту водопроводного отверстия $h_{зп}$; одновременно это является продолжительностью первого периода

$$t_3 = \frac{h_{зп}}{u_{з доп}} = T_1, \text{ с.}$$

Задается шаг расчета по времени $\Delta t = 30$ с или 60 с и на каждом шаге определяются следующие параметры:

1. Высота подъема затвора

$$h_3 = u_3 \text{ доп} t, \text{ м}; \quad (2.4)$$

2. Напор

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_d} - \frac{\omega \sqrt{2g}}{2\Omega} \int_0^t \mu_t dt, \quad (2.5)$$

где Ω – площадь зеркала камеры;

ω – суммарная площадь водопроводных отверстий в расчетном сечении.

3. Расход

$$Q = \mu_t \omega \sqrt{2gH_t}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.6)$$

где μ_t – коэффициент расхода системы питания определяется по ранее построенному графику $\mu_t = f(h_3)$.

Превышение уровня воды в камере над исходным уровнем

$$y = H_d - H_t, \text{ м}. \quad (2.7)$$

4. Давление в галерее за затворами. Определяется для систем питания с короткими обходными галереями и галереями в стенах или днище

$$\frac{P}{\gamma} = y_c + \frac{\xi_{\text{н}}}{\sum \xi} H_t - \frac{1 + 2\sqrt{\xi_3}}{\sum \xi} H_t + y, \text{ м}, \quad (2.8)$$

где y_c – расстояние от геометрического центра поперечного сечения галерей до уровня нижнего бьефа, м. Определяется по чертежу головы;

$\sum \xi$ и ξ_3 – соответственно суммарный коэффициент сопротивления системы питания и коэффициент сопротивления затвора в момент расчета давления в галерее за затворами, определяемые по графикам зависимости $\sum \xi = f(h_3)$ и $\xi_3 = f(h_3)$, построенным по данным табл. 2.2.

ξ_n – сумма коэффициентов сопротивлений участка системы питания ниже рабочего затвора;

Для сосредоточенной системы питания (см. рис. 2.1)

$$\xi_n = \xi_{\text{паз}} + \xi_{\text{пов}90^\circ} + \xi_{\text{дл}} + \xi_{\text{вых}} \left(\frac{\omega_{\Gamma}}{\omega_{\text{вых}}} \right)^2;$$

для распределительной системы с галереями в стенах при наполнении (см. рис. 2.2):

$$\xi_n = \xi_{\text{паз}} + \sum \xi_{\text{пов}\theta^\circ} + \xi_{\text{дл}} + \xi_{\Gamma \text{ вып}} + \left(\xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{посл. вып}} \right) \left(\frac{\omega_{\Gamma}}{\omega_{\text{вып}}} \right)^2.$$

При расчете $\xi_{\text{дл}}$ длина галереи определяется по расчетной схеме, начиная от рабочего затвора водопроводной галереи, а в сумму сопротивлений поворотов входят сопротивления поворотов, расположенных вниз по течению от рабочего затвора.

При расчете напора по формуле (2.5) интеграл определяется приближенно как сумма $\sum_0^t \mu_{\text{ср}} \Delta t$, где $\mu_{\text{ср}}$ – среднее значение μ_t на данном шаге по времени Δt .

Расчет гидравлических характеристик в первом промежутке рекомендуется выполнять в табличной форме. Для расчета систем наполнения через клинкетные отверстия и под полноповоротные сегментные ворота используется табл. 2.3, для распределительных систем и систем с короткими обходными галереями – табл. 2.4.

Таблица 2.3

Расчет гидравлических характеристик в первом периоде для систем наполнения через клинкетные отверстия и полноповоротные сегментные ворота

t, c	$h_3 = (\mu_3)_{доп} \cdot t, м$	μ_i с графика	$\mu_{ср}$	$\mu_{ср} \Delta t$	$\sum \mu_{i,ср} \Delta t = \sum (5)$	$[0,5\omega(2g)^{0,5}/\Omega] \cdot (6)$	$(H_t)^{0,5} = (H_d)^{0,5} - (7)$	$H_t = (8)^2, м$	$Q = \mu_i \omega (2g)^{0,5} \cdot (8), м^3/с$	$y = H_d - H_t, м$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0	0			0	0	$\sqrt{H_d}$	H_d	0	0
⋮	⋮	⋮					⋮	⋮	⋮	⋮
T_1	$h_{3п}$	μ_{t1}					$\sqrt{H_{t1}}$	H_{t1}	Q_{t1}	y_{t1}

Таблица 2.4

Расчет гидравлических характеристик в первом периоде наполнения для распределительных систем питания и систем с короткими обходными галереями

t, c	$h_3 = (u_3)_{\text{доп}} \cdot t, \text{ м}$	μ_t с графика	$\mu_{\text{ср}}$	$\mu_{\text{ср}} \Delta t$	$\sum \mu_{\text{ср}} \Delta t = \sum (5)$	$[0,5 \omega (2g)^{0,5} / \Omega] \cdot (6)$	$(H_t)^{0,5} = (H_d)^{0,5} - (7)$	$H_t = (8)^2, \text{ м}$	$Q = \mu_{\omega} (2g)^{0,5} \cdot (8), \text{ м}^3/\text{с}$	$y = H_d - H_t, \text{ м}$	$y + y_c, \text{ м}$	ξ_3 для времени t	$\sum \xi$ для времени t	$(\xi_{\text{ср}} H_t / \sum \xi), \text{ м}$	$H_{t1} [1 + 2(\xi_3)^{0,5}] / \sum \xi, \text{ м}$	$p/\gamma = (12) + (15) - (16), \text{ м}$
1	0	...			0	0	$\sqrt{H_d}$	H_d	0	0	y_c	∞	∞	0	0	y_c
...						
T_1	$h_{3\text{п}}$	μ_{t1}					$\sqrt{H_{t1}}$	H_{t1}	Q_{t1}	y_{t1}						

Первый период заканчивается в момент остановки затворов t_3 при их подъеме на полную высоту $h_{3\text{п}}$.

2.3.2. Расчет характеристик для второго периода наполнения камеры шлюза через клинкетные отверстия, полноповоротные сегментные ворота, короткие обходные галереи

Задается шаг по времени $\Delta = 30$ с или 60 с и определяются гидравлические характеристики:

а) напор

$$\sqrt{H_t} = \sqrt{H_{t1}} - \frac{\mu_0 \omega \sqrt{2g}}{2\Omega} t, \quad (2.10)$$

где μ_0 – коэффициент расхода системы при полностью подня-

тых затворах: $\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{\sum \xi_i}}$;

б) расход

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2gH_t}, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \quad (2.11)$$

в) уровень воды в камере

$$y = H_d - H_t, \text{ м}, \quad (2.12)$$

где H_{t1} – напор в конце первого периода;

t – время во втором периоде, изменяющееся, от 0 до T_2 ; здесь T_2 продолжительность второго промежутка, определяемая по формуле:

$$T_2 = \frac{2\Omega \sqrt{H_{t1}}}{\mu_0 \omega \sqrt{2g}}, \text{ с}.$$

Расчет гидравлических характеристик во втором периоде рекомендуется выполнять в табличной форме (табл. 2.5).

Расчет гидравлических характеристик во втором периоде

t, c	Общее время от начала первого периода $T_1 + t$	$[0,5\mu_0\omega(2g)^{0,5}/\Omega] \cdot (1)$	$(H_t)^{0,5} = (H_{t1})^{0,5} - (3)$	$H_t = (4)^2, m$	$Q = \mu_0\omega(2g)^{0,5} \cdot (4), m^3/c$	$y = H_d - H_t, m$
1	2	3	4	5	6	7
0	T_1	0	$\sqrt{H_{t1}}$	H_{t1}	Q_{t1}	y_{t1}

Второй период заканчивается в момент выравнивания уровня воды в камере и верхнем бьефе, когда напор $H_t = 0$.

По результатам расчета гидравлических характеристик в первом и во втором периоде наполнения строятся графики: изменения во времени высоты подъема затвора $h_3 = f(t)$; коэффициента расхода $\mu_t = f(t)$; напора $H_t = f(t)$; расхода $Q = f(t)$; превышения уровня воды в камере над исходным уровнем $y = f(t)$. Окончанием второго промежутка на гидравлической характеристике является момент времени, когда уровень воды в камере поднимется до уровня верхнего бьефа. Одновременно это момент окончания процесса наполнения камеры (рис. 2.3). Полное время наполнения камеры T будет равно сумме времен первого и второго периодов наполнения.

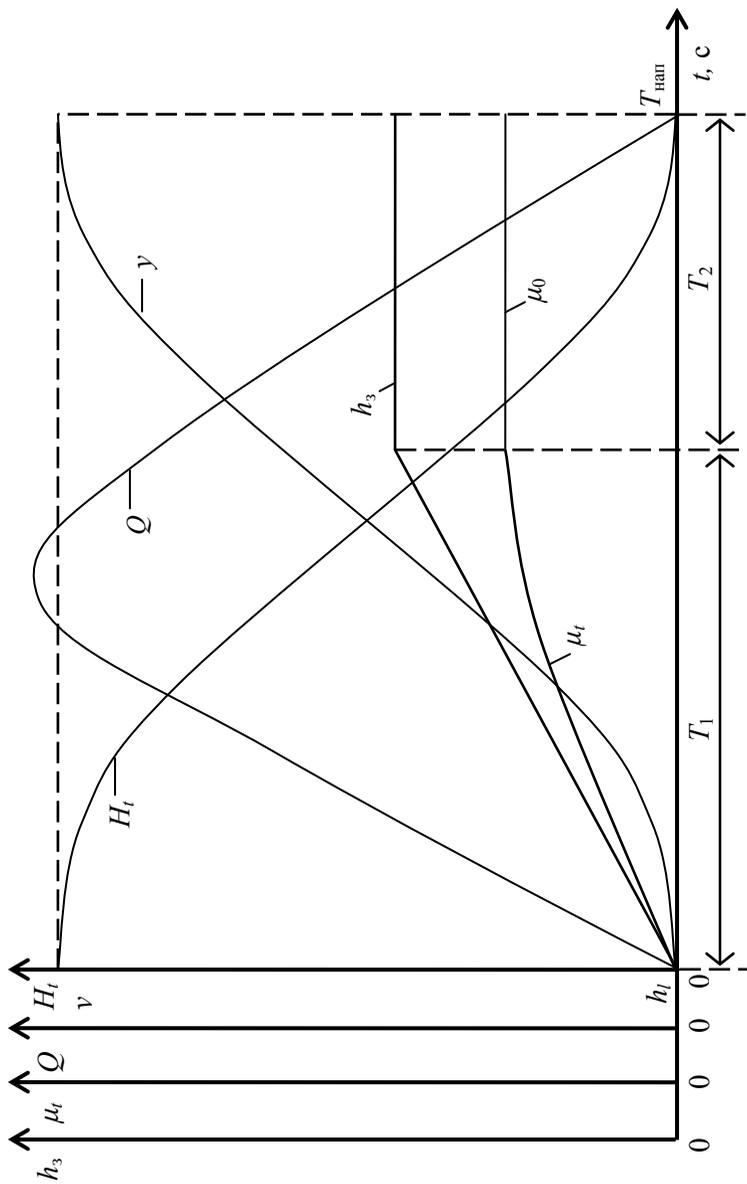


Рис. 2.3. Гидравлические характеристики наполнения камеры шлюза через клинкетные отверстия, полноповоротные сегментные ворота, короткие обходные галереи

2.3.3. Расчет характеристик для второго периода наполнения камеры шлюза с распределительной системой питания

Особенность гидравлического расчета распределительной системы питания во втором периоде – необходимость учета сил инерции массы воды, находящейся в длинных водопроводных галереях. Инерционные силы проявляются через инерционный напор $h_{и}$. В первом периоде наполнения этим напором можно пренебречь. Во втором периоде он становится соизмеримым с действующим напором H_t и это учитывается.

Второй промежуток продолжается от момента остановки затвора до момента первого выравнивания уровней воды в камере и верхнем бьефе, когда напор $H_t = 0$. Его продолжительность определяется по формуле

$$T_2 = \frac{2\Omega}{\mu_0 \omega \sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_{t1} + \Delta} - \sqrt{\Delta} \right), \text{ с}, \quad (2.12)$$

где H_{t1} – напор в конце первого промежутка, м;

Δ – наибольшее значение инерционного напора, равное

$$\Delta = l_{\text{пр}} \mu_0^2 \frac{\omega}{\Omega}, \text{ м}, \quad (2.13)$$

где $l_{\text{пр}}$ – приведенная к расчетной площади ω длина водопроводных галерей:

$$l_{\text{пр}} = \sum_i \frac{\omega}{\omega_i} l_i, \text{ м}, \quad (2.14)$$

где ω_i , l_i – соответственно площадь сечения и длина рассматриваемого участка галереи;

i – количество участков, имеющих постоянную площадь сечения по длине.

Для системы питания, изображенной на рис. 2.2, выделяют три участка с постоянной площадью сечения. Первый длиной $l_{Г1} - l_{пов1}$ и площадью $\omega_{Г}$, включающий длины прямолинейной вставки для размещения затворов водопроводных галерей, двух поворотов на угол θ° , прямолинейной вставки от окончания поворотов до начала участка с выпусками.

Второй участок длиной $l_{Г\text{ вып}}$ и площадью $\omega_{Г\text{ вып}} = (\omega/2)$ от начала участка галереи с выпусками до его конца. Третий участок представляет собой $n_{в}$ выпусков длиной $l_{\text{вып}}$, расположенных на равных расстояниях друг от друга и имеющих площадь $f_{\text{вып}}$ каждый.

Расчет приведенной длины производится по формуле (2.14) от третьего участка к первому.

В общем случае в начале выпуски водопроводных галерей приводятся к площади галереи $\omega_{Г\text{ вып}}$. Потом участок галереи с выпусками длиной $l_{Г\text{ вып}}$ приводится к площади галереи без выпусков $\omega_{Г}$. И на последнем этапе длина водопроводных галерей в стенах или днище камеры вместе с приведенной длиной участка галереи с выпусками приводятся к расчетной площади ω .

Так как в случае запроектированной в КП системы питания количество галерей равно 2 и $\omega_{Г} = \omega/2$, окончательно приведенная длина водопроводных галерей для схемы на рис. 2.2 равна

$$l_{пр} = l_{Г1} - l_{пов1} + \frac{\omega l_{пов1}}{0,5(\omega_{вх} + \omega)} + 0,5l_{Г\text{ вып}} + \frac{\omega l_{\text{вып}}}{2n_{в}f_{\text{вып}}}.$$

При расчете приведенной длины участка галереи с выпусками вместо длины $l_{Г\text{ вып}}$ берется длина $l_{Г\text{ вып}}/2$, поскольку скорость потока в водопроводной галерее меняется от некоторой величины v в начале участка до 0 в конце участка. Используя приведенную длину галерей, по формуле (2.13) вычисляется Δ .

Далее задается шаг по времени $\Delta t = 30$ с или 60 с и вычисляется:

1. Напор

$$H_t = \left[\sqrt{H_{t1} + \Delta} - \frac{\mu_0 \omega \sqrt{2g}}{2\Omega} (t - t_3) \right]^2 - \Delta, \text{ м}; \quad (2.15)$$

2. Расход

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2g (H_t + \Delta)}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2.16)$$

3. Подъем уровня воды в камере

$$y = H_d - H_t. \quad (2.17)$$

После выравнивания уровней в камере и верхнем бьефе вода под действием сил инерции (под действием инерционного напора $h_{и}$) будет продолжать поступать в камеру, и расход Q не будет равен нулю. Он станет равным нулю в тот момент, когда в камере произойдет инерционное повышение уровня воды на величину Δ (уровень воды в камере станет выше уровня воды в верхнем бьефе на величину Δ) и напор станет отрицательным: $H_t = -\Delta$. Продолжительность промежутка времени $\Delta t_{в}$ от момента первого выравнивания уровней воды в камере и верхнем бьефе (когда $H_t = 0$) до момента, когда расход станет равным нулю $Q = 0$ (когда $H_t = -\Delta$), определяется по формуле

$$\Delta t_{в} = \frac{2\Omega}{\mu_0 \omega \sqrt{2g}} \sqrt{\Delta}, \text{ с.}$$

В связи с изложенным, расчет второго промежутка не заканчивается в момент первого выравнивания уровней воды

в камере и верхнем бьефе (когда $H_t = 0$), а продолжается до момента равенства нулю расхода воды.

Расчет гидравлических характеристик во втором промежутке выполняется в табличной форме (форма табл. 2.6).

Таблица 2.6

Расчет гидравлических характеристик во втором промежутке с учетом сил инерции

t , с (с начала наполнения)	$t - t_3$, М	$\frac{\mu_0 \omega \sqrt{2g}}{2\Omega} \cdot (2)$	$\sqrt{H_{t1} + \Delta}$	(4) - (3)	(5) ²	$H_t = (6) - \Delta$, м	$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2g(H_t + \Delta)}$, м ³ /с	$y = H_d - H_t$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Примечание. Последнее значение времени t в табл. 6, соответствующее равенству расхода нулю, равно $T_1 + T_2 + \Delta t_B$.
Время наполнения камеры

$$T = T_1 + T_2, \text{ с.} \quad (2.18)$$

По данным расчетов (табл. 2.6) строятся графики изменения во времени гидравлических характеристик для второго промежутка. Концом второго промежутка на гидравлической характеристике является момент первого выравнивания уровней воды в камере и верхнем бьефе. Окончанием построения гидравлических характеристик является момент равенства расхода нулю (рис. 2.4).

2.4. Оценка параметров запроектированной системы наполнения

Для систем наполнения камеры шлюза через отверстия, затопленные в начале наполнения, производится проверка условий стоянки расчетного судна (состава) в процессе наполнения камеры путем определения величины первого пика волновой составляющей гидродинамической силы P_1 . Величина силы определяется по приближенной формуле А. В. Михайлова [5]:

$$P_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{D\beta}{g(\omega_k - \chi)}, \text{ кН}, \quad (2.19)$$

где $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ – приращение расхода воды по времени при первом пробеге волны наполнения в камере. Это значение необходимо определить по графику зависимости $Q = f(t)$ в начальный момент наполнения камеры;

β – коэффициент, характеризующий совершенство системы питания: для простой распределительной $\beta = 0,4$ сосредоточенной – $\beta = 1,0$;

ω_k – площадь поперечного сечения камеры при \downarrow МУНБ;

χ – площадь миделевого сечения расчетного судна;

После определения P_1 необходимо проверить выполнение условия (1) $P_1 \leq F_l$, что будет свидетельствовать об обеспечении нормативных условий стоянки расчетного судна (состава) при наполнении и соответствии параметров системы нормативным требованиям. Если это условие не выполняется, то изменяется скорость подъема затвора и расчет повторяется. Если при этом относительное время, вычисляемое по зависимости: $k_3 = t_3/T$, оказывается больше 0,6 при распределительных системах и больше 0,8 при сосредоточенных, то изменяются размеры водопроводных галерей в сторону уменьшения их площади.

Для распределительных и сосредоточенных систем, где наполнение осуществляется через галереи, необходимо по графику зависимости давления за затвором от времени определить минимум давления, и в случае, если оно меньше 60–80 Па, заглубить расчетное сечение галерей на нужную глубину под уровень нижнего бьефа.

Для распределительных систем производится сравнение величины инерционного подъема уровня воды в камере Δ , рассчитанного по формуле (2.13), с нормативной его величиной, равной 0,25 м. Если $\Delta > 0,25$ м, применяется предварительное закрытие затворов водопроводных галерей несколько раньше конца наполнения камеры.

3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОПОРОЖНЕНИЯ КАМЕРЫ ШЛЮЗА

Опорожнение камер судоходных шлюзов чаще всего осуществляется через системы опорожнения с отверстиями, затопленными в начале процесса. В курсовом проекте это либо кроткие обходные галереи в стенах голов, либо галереи в стенах или днищах камер. Принципиальных отличий в расчете опорожнения по сравнению с расчетом наполнения нет. Однако учитывается то обстоятельство, что длина водопроводного тракта систем опорожнения практически всегда больше, чем у систем наполнения; отличается состав местных сопротивлений, входящих в $\Sigma \xi_i$; используются несколько иные критерии для оценки результатов расчета. Последовательность расчета гидравлических характеристик опорожнения такая же, как и при расчете характеристик наполнения, расчет непосредственно характеристик ведется по зависимостям (2.4)–(2.13). При расчете и построении гидравлических характеристик учитывается, что уровень воды в камере уменьшается.

3.1. Оценка параметров запроектированной системы опорожнения

Оценка производится путем проверки условий отстоя судов в камере и в нижнем подходном канале. В камере условия отстоя проверяются по критериям (1, 6), в распределительной системе – дополнительно и по критерию (7). В случае не обеспечения запроектированной системой выполнения указанных условий осуществляются те же мероприятия, что и при проверке системы наполнения.

Условия отстоя в нижнем подходном канале проверяются по критериям (1) и (3). При этом величина первого пика волновой составляющей гидродинамической силы P_1 рассчитывается по приближенной формуле А. В. Михайлова [5], учитывающей не только волновую, но и скоростную составляющие:

$$P_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot \frac{D\sqrt{\alpha_n}}{g(\omega_{\text{кан}} - \chi)} + \frac{2Q_2 D(1 - \sqrt{\alpha_n})}{l_s \sqrt{g(\omega_{\text{кан}} - \chi)} b_{\text{д.у}}}, \text{ кН}, \quad (2.20)$$

где $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{Q_2 - Q_1}{t_c}$ – среднее приращение расхода за время t_c ,

где $t_c = \frac{l_s \sqrt{b_{\text{д.у}}}}{\sqrt{g(\omega_{\text{кан}} - \chi)}}$ – время пробега волной судна;

α – коэффициент, характеризующий степень уменьшения площади канала расчетным судном и определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\omega_{\text{кан}} - \chi}{\omega_{\text{кан}}};$$

l_s – длина расчетного судна, наибольшего судна в буксируемом или толкаемом составе;

$\omega_{\text{кан}}$ – площадь поперечного сечения подходного канала в уширенной части при ↓ МУНБ;

χ – площадь миделевого сечения расчетного судна;
 $b_{д,у}$ – ширина подходного канала в уширенной части.

Значения Q_2 и Q_1 определяются по графику поступающего через нижнюю голову в канал расхода $Q = f(t)$, для чего от времени t_2 , отвечающего Q_{\max} , влево откладывается отрезок времени t_c и отмечается время t_1 , где расход равен Q_1 .

Оценка условий отстоя судов по критерию (3) выполняется путем сравнения нормативного значения средней скорости течения воды в канале ($v_f \leq 0,8$ м/с) со средней скоростью, вычисленной по формуле

$$v = \frac{Q_{\max}}{\omega_{\text{кан}} - \chi},$$

где Q_{\max} – максимальный расход воды, определяемый по графику $Q = f(t)$.

В случае невыполнения критериев (1) и (3) при отстое судов в нижнем подходном канале для обеспечения их выполнения наряду с вышеуказанными мероприятиями рассматривается вопрос об увеличении площади живого сечения канала в уширенной части путем увеличения его размеров.

Список использованных источников

1. Богославчик, П. М. Гидротехнические сооружения комплексных гидроузлов : учебное пособие для вузов / П. М. Богославчик [и др.] ; под ред. Г. Г. Круглова. – Минск : БНТУ, 2006. – 585 с.
2. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения : ТКП 45-3.04-171–2009 (022550). – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2010. – 56 с.
3. Пособие по проектированию судоходных шлюзов к СНиП 2.06.07–87. – М. : Гидропроект, 1988. – 352 с.
4. Качановский, Б. Д. Гидравлика судоходных шлюзов / Б. Д. Качановский. – М.–Л. : Речиздат, 1951. – 271 с.
5. Михайлов, А. В. Судоходные шлюзы / А. В. Михайлов. – М. : Транспорт, 1966. – 528 с.
6. Михайлов, А. В. Внутренние водные пути / А. В. Михайлов. – М. : Стройиздат, 1973. – 328 с.
7. Левкевич, Е. М. Гидравлический расчет судоходного шлюза : методические указания к курсовому проекту по курсу «Водные пути и порты» для студентов дневного, вечернего и заочного обучения специальности 1203 «Гидротехническое строительство речных сооружений и ГЭС» / Е. М. Левкевич. – Минск : БПИ, 1985. – 43 с.
8. Михайлов, А. В. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа / А. В. Михайлов. – М. : АСВ, 2004. – Ч. 1: Внутренние водные пути. – 2004. – 448 с.
9. Семанов, Н. А. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. – М. : Транспорт, 1970. – 352 с.
10. Кононов, В. В. Гидротехнические сооружения водных путей, портов и континентального шельфа / В. В. Кононов. – СПб. : СПГУВК, 2009. – Ч. 1: Судоходный канал и бетонный шлюз. – 2009. – 141 с.
11. Гарибин, П. А. Речные судоходные шлюзы (типы шлюзов, системы питания и пропускная способность) : учебное пособие / П. А. Гарибин, С. А. Головков. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2009. – 133 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Коэффициенты сопротивлений элементов водопроводного тракта

№ п/п	Названия коэффициентов сопротивлений	Обозначения и величины коэффициентов сопротивлений	При- меча- ния
1	2	3	4
1	На входе	$\xi_{\text{вх}} = 0,50$ на входе без закругления кромок; $\xi_{\text{вх}} = 0,20-0,25$ на входе со слегка закругленной кромкой; $\xi_{\text{вх}} = 0,05-0,10$ на входе плавного очертания;	
2	В сороудерживающих решетках	$\xi_{\text{реш}} = \beta \left(\frac{S}{b} \right)^{4/3}$ при отнесении к сечению на входе, где β – коэффициент, зависящий от формы стержней: 2,42 – для прямоугольных стержней; 1,83 – для прямоугольных стержней с верховым торцом, закругленным по дуге окружности; 1,67 – то же, и с низовым закругленным торцом; 1,04 – то же, но со скошенным низовым торцом стержня, начиная с 0,6 его ширины; 0,92 – для скошенных по всей ширине стержней с верховым закругленным торцом; 0,76 – для скошенных по всей ширине стержней и плавно очерченных с верхового и низового торца; 1,79 – для круглых стержней; S – толщина стержня решетки; b – расстояние между стержнями в свету; обычно принимают $\frac{S}{b} = \frac{1}{5} - \frac{1}{10}$	Фор- мула Киш- мера

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4
3	На поворотах	$\xi_{\text{пов}} = \xi' \frac{\theta^\circ}{90^\circ}$, где ξ' – коэффициент сопротивления при повороте на 90° , определяемый для галереи прямоугольного сечения по величине отношений: $\frac{a}{2R}$ здесь a – ширина галереи, R – радиус закругления оси галереи: $\frac{a}{2R}$: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; ξ' : 0,12; 0,14; 0,18; 0,25; 0,40; 0,64; 1,02; 1,55; 2,27; 3,23; θ° – угол поворота галереи в градусах	
4	Разделение потока	$\xi_{\text{разд}} = 0,20$	
5	По длине	$\xi_{\text{дл}} = \frac{2gl}{C^2 R}$, где l – длина участка галереи, имеющего одинаковые размеры поперечного сечения; C – коэффициент Шези, определяемый по формуле Маннинга: $C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \text{ м}^{0,5}/\text{с},$ здесь n – коэффициент шероховатости бетона, равный 0,013; R – гидравлический радиус сечения галереи на рассматриваемом участке: $R = \omega/\chi,$ где ω – площадь сечения галереи рассматриваемого участка; χ – ее смоченный периметр	

Продолжение табл. П.1

1	2	3	4
6	Участок галереи с выпусками	$\xi_{\Gamma \text{ вып}} = \frac{\alpha(n^2 + 2n)}{(n+1)^2} + \frac{2gl_{\Gamma \text{ вып}}(2n+1)}{6C^2R(n+1)}$ <p>где $\alpha = 0,25$ – опытный коэффициент для прямоугольного сечения галереи и $\alpha = 0,1$ – для круглого сечения галерей; n – число выпусков на участке галереи; $l_{\Gamma \text{ вып}}$ – длина участка галереи с выпусками; C – коэффициент Шези для этого же участка галереи; R – гидравлический радиус сечения галереи с выпусками</p>	Формула Коновалова
7	Выход потока из выпусков в камеру	$\xi_{\text{вых}} = 1,0$	
8	Последний выпуск в камеру	$\xi_{\text{посл вып}} = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2$, где $\varepsilon = 0,6$ – коэффициент сжатия струи при выходе	
9	Внезапное сужение	ξ_c – зависит от отношения ω_2/ω_1 , где ω_1, ω_2 – площади сечения галерей, соответственно перед и после внезапного сужения, если ω_2/ω_1 равны: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0, то ξ_c равны соответственно: 0,41; 0,40; 0,38; 0,36; 0,34; 0,30; 0,27; 0,20; 0,16; 0,10; 0,0	
10	Внезапное расширение	ξ_p – зависит от отношения ω_2/ω_1 , где ω_1, ω_2 – площади сечения галерей, соответственно перед и после внезапного расширения. Если ω_2/ω_1 равны 10; 9; 8; 7; 6; 5; 4; 3; 2; 1, то ξ_p равны соответственно 81; 64; 49; 36; 25; 16; 9; 4; 1; 0	

Окончание табл. П.1

1	2	3	4
11	Постепенное расширение (по конусу с углом θ°)	$\xi_{р.к} = k_p \xi_p$, где k_p – коэффициент, учитывающий постепенное расширение, зависящий от угла конусности θ° ; если θ° равен 5; 8; 10; 12; 15; 20; 25; 30; 40; 50 > 50 градусов; то k_p равен 0,13; 0,14; 0,16; 0,22; 0,30; 0,42; 0,62; 0,71; 0,90; 1,0; 1,10	
12	Пазы ремонтных затворов	$\xi_{паз}$ – зависит от типа затворов: плоский – 0,04; поворотный – 0,16; цилиндрический – 1,30; сегментный – 0,17; плунжерный – 0,11; вальцовый – 0,00	

Таблица П.2

Коэффициенты расхода $\mu' = f(\mu_0, n)$

Плоский затвор

$n \backslash \mu_0$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,895	По прямой
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,175	0,142	0,120	0,103	0,090	0,080	0,100
0,2	0,350	0,288	0,242	0,210	0,185	0,166	0,200
0,3	0,510	0,428	0,368	0,320	0,285	0,256	0,300
0,4	0,660	0,574	0,505	0,449	0,402	0,365	0,400
0,5	0,780	0,706	0,638	0,582	0,530	0,488	0,500
0,6	0,865	0,812	0,760	0,705	0,655	0,612	0,600
0,7	0,938	0,910	0,875	0,840	0,805	0,770	0,700
0,8	0,970	0,954	0,937	0,916	0,895	0,872	0,800
0,9	0,990	0,990	0,985	0,979	0,972	0,965	0,900
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Сегментный затвор

$n \backslash \mu_0$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,925	По прямой
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0
0,125	0,265	0,216	0,181	0,156	0,137	0,119	0,125
0,250	0,495	0,414	0,357	0,311	0,275	0,240	0,250
0,375	0,675	0,590	0,520	0,463	0,415	0,367	0,375
0,500	0,805	0,734	0,670	0,612	0,560	0,506	0,500
0,625	0,898	0,850	0,803	0,756	0,710	0,660	0,625
0,750	0,950	0,930	0,900	0,874	0,841	0,840	0,750
0,875	0,985	0,980	0,970	0,965	0,950	0,932	0,875
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Цилиндрический затвор

$n \backslash \mu_0$	0,4	0,5	0,6	0,666	По прямой
1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0
0,1	0,270	0,218	0,184	0,167	0,100
0,2	0,472	0,396	0,337	0,309	0,200
0,3	0,672	0,588	0,520	0,482	0,300
0,4	0,802	0,732	0,670	0,633	0,400
0,5	0,888	0,838	0,790	0,758	0,500
0,6	0,932	0,900	0,866	0,840	0,600
0,7	0,962	0,942	0,922	0,908	0,700
0,8	0,980	0,970	0,960	0,950	0,800
0,9	0,995	0,990	0,986	0,980	0,900
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Поворотный затвор

$n \backslash \mu_0$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,93	По прямой
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0
0,125	0,205	0,166	0,138	0,118	0,104	0,091	0,125
0,250	0,320	0,260	0,218	0,188	0,166	0,143	0,250
0,375	0,488	0,408	0,348	0,304	0,269	0,234	0,375
0,500	0,670	0,586	0,515	0,457	0,411	0,362	0,500
0,625	0,835	0,770	0,710	0,655	0,605	0,546	0,625
0,750	0,931	0,900	0,864	0,825	0,790	0,740	0,750
0,875	0,980	0,970	0,960	0,943	0,931	0,905	0,875
1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Обратный сегментный затвор

$n \backslash \mu_0$	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	По прямой
1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,141	0,128	0,118	0,109	0,101	0,100
0,2	0,296	0,271	0,250	0,231	0,214	0,200
0,3	0,456	0,423	0,393	0,366	0,340	0,300
0,4	0,604	0,568	0,534	0,508	0,472	0,400
0,5	0,740	0,708	0,678	0,647	0,613	0,500
0,6	0,846	0,822	0,799	0,774	0,740	0,600
0,7	0,921	0,905	0,893	0,875	0,852	0,700
0,8	0,963	0,954	0,948	0,938	0,921	0,800
0,9	0,990	0,988	0,988	0,983	0,972	0,900
1,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Гидравлический расчет шлюза.....	5
1. Гидравлический расчет наполнения камеры шлюза через незатопленные в начале наполнения отверстия.....	7
2. Гидравлический расчет наполнения камеры шлюза через затопленное в начале наполнения отверстие	14
2.1. Составление расчетной схемы	15
2.2. Уточнение коэффициент расхода системы наполнения при полностью поднятом затворе.....	18
2.3. Расчет гидравлических характеристик наполнения камеры шлюза	23
2.3.1. Расчет характеристик для первого периода наполнения камеры шлюза	23
2.3.2. Расчет характеристик для второго периода наполнения камеры шлюза через клинкетные отверстия, полноповоротные сегментные ворота, короткие обходные галереи	30
2.3.3. Расчет характеристик для второго периода наполнения камеры шлюза через галереи в стенах и днище	34
2.4. Оценка параметров запроектированной системы наполнения.....	39
3. Гидравлический расчет опорожнения камеры шлюза	40
Список использованных источников.....	43
Приложение.....	44

Учебное издание

БОГДАНОВИЧ Михаил Иванович

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМ ПИТАНИЯ
СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ**

Методическое пособие
по выполнению курсового проекта
на тему «Судоходный шлюз»
по дисциплинам «Водные пути и порты»,
«Водные пути и технический флот»
для студентов специальности 1-70 04 01
«Водохозяйственное строительство»

Редактор *О. В. Ткачук*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 24.12.2015. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,96. Уч.-изд. л. 2,32. Тираж 100. Заказ 1289.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.