

Гидравлические исследования по определению гидродинамического воздействия на затворы туннельного строительного водосброса СТ4 Рогунской ГЭС

Алексеевская М. В.¹, ст. научн. сотрудник,
 Судольский Г. А.², кандидат техн. наук, зав. лабораторией
 “Гидравлика сооружений, русел и акваторий”,
 Шильяев А. В.³, вед. инж. (АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”),
 Холов Ф. А.⁴, менеджер проекта (ОАО “Точикгидроэлектромонтаж”,
 Республика Таджикистан)

На крупномасштабной физической модели выполнены гидравлические исследования по определению гидродинамического воздействия на сегментные затворы строительного туннеля. Изучены также условия закрытия аварийно-ремонтных плоских затворов. Обоснованы оптимальные размеры устройств для подвода воздуха в камеру сегментных затворов.

Ключевые слова: туннель, сегментный затвор, плоский затвор, экспериментальные гидравлические исследования, усреднённые и пульсационные гидродинамические нагрузки, кавитационная эрозия.

Hydraulic studies to determine the hydrodynamic impact on the gates of the diversion tunnel DT4 of the Rogun HPP

Alekseevskaya M. V.¹, Senior Research Associate,
 Sudolsky G. A.², Ph. D. (Eng), Head of Laboratory Hydraulics of Structures,
 River Channels and Water Areas,
 Shilyaev A. V.³, Lead Engineer JSC VNIIG im B. E. Vedeneeva,
 Holov F. A.⁴ TGEM, Tajikistan

Using a large-scale physical model, hydraulic studies were carried out to determine the hydrodynamic impact on the segmental gates of a diversion tunnel. The conditions for closing emergency repair flat gates were also studied. The optimal dimensions of devices for supplying air into the chamber of segmental valves are substantiated.

Keywords: tunnel, segmental gate, flat gate, experimental hydraulic studies, averaged and pulsating hydrodynamic loads, cavitation erosion.

Рогунская ГЭС сооружается на реке Вахш в Таджикистане. На ГЭС предполагается установить 6 агрегатов общей мощностью 3600 МВт. В состав комплекса водосбросных сооружений, расположенных на правом берегу реки Вахш по высоте плотины размещены 5 рядов последовательно возводимых строительных туннелей. Строительные туннели первого и второго яруса используются после завершения пропуска расходов в качестве отводящих трактов от турбин, расположенных в подземном здании ГЭС. Строительный туннель 3-го яруса уже используется для пропуска расходов.

В настоящее время выполняется строительство туннеля 4-го яруса СТ4, поэтому его гидравличе-

ское обоснование является актуальным. Конструкция туннеля СТ4 предусматривает размещение камер рабочих сегментных затворов в конце напорного участка туннеля диаметром 15 м и длиной около 1400 м. К особенностям рассматриваемого туннеля следует отнести разветвление тракта туннеля вблизи выходной части напорного участка на 2 ветки диаметром по 10,6 м, в конце которых устроены камеры сегментных затворов из двух пролётов в каждой. За указанными камерами расположены безнапорные участки туннеля площадью по 125 м², заканчивающиеся носками-трамплинами, с которых осуществляется отброс струй в русло реки Вахш.

Постоянная облицовка туннеля СТ4 должна быть выполнена из железобетона, за исключением камер затворов и примыкающих к ним участков, где будет применена стальная облицовка.

¹ AlekseevskajaMV@vniig.ru

² SudolskyGA@vniig.ru

³ shilyaevav@vniig.ru

⁴ holovf@mail.ru

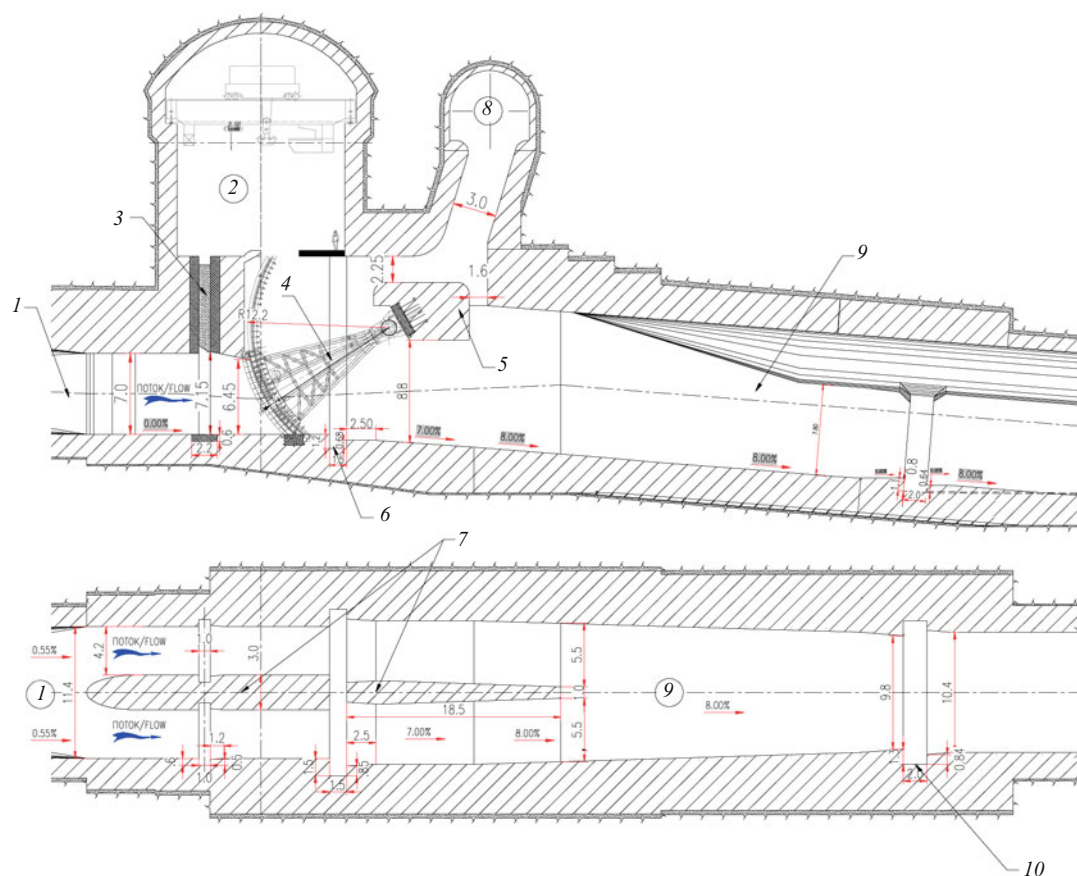


Рис. 1. Затворная камера строительного туннеля СТ4:

1 – напорный участок СТ4; 2 – камера сегментных затворов; 3 – плоский затвор; 4 – сегментный затвор; 5 – балка; 6 – паз аэратор; 7 – промежуточный бык; 8 – аэрационный туннель; 9 – безнапорный участок СТ4; 10 – паз аэратор

Расчётный напор на затворы туннеля СТ4 H_p (разница между отметками НПУ и дна камеры сегментных затворов) в проекте принят равным 120 м. В экстремальных случаях допускается увеличение расчётного напора до 150 м. Расчётный расход туннеля СТ4 составляет $Q_p = 3500 \text{ м}^3/\text{с}$.

Конструкция камеры сегментных затворов показана на рис. 1. Основной рабочий сегментный затвор с радиусом обшивки 12,2 м, установленный в конце напорного участка туннеля, перекрывает сечение $4,20 \times 6,45$ м. Уплотнения сегментного затвора размещены на дне и боковых стенах камеры. Плоский скользящий аварийно-ремонтный затвор выполнен размером $4,2 \times 7,0$ м. Пазы плоского затвора длиной 1,0 м смещены в сторону верхнего бьефа от сегментного затвора на 2,75 м. На участке потолка между указанными затворами выполнен конфузур с углом 12° .

Для аэрации потока в камере сегментных затворов на дне и по боковым стенам предусмотрен пазовый аэратор длиной 1,5 м. Уступы на боковых стенах в створе паза составляют 1,5 м на боковых стенах и 1,2 м на дне. Увеличение ширины пролёта тракта за пазом-аэратором составляет 1,0 м. К особенностям конструкции промежуточного быка в камере следует отнести наличие проёма длиной 1,5 м,

выполненного на всю высоту камеры и совмещённого с основным створом аэрации потока.

Подвод воздуха к обеим затворным камерам осуществляется из аэрационного туннеля площадью 92 м^2 с помощью аэрационных труб, площадь сечения которых составляет для каждого пролёта $16,0 \text{ м}^2$ (рис. 1). В камере сегментных затворов аэрация струи, выходящей из-под затвора, обеспечивается через пазовый аэратор (рис. 1). Аэрация безнапорного потока за камерой дополнительно осуществляется через прямоугольную трубу сечением $6,7 \text{ м}^2$ (рис. 1).

На безнапорных участках туннеля, выполненных с уклоном 8% ($4,6^\circ$), с шагом 70 м, предусмотрены пазовые аэраторы.

Конструкции закрытых водосбросов, материалы их исследований и расчётов. В рекомендациях [1 – 4] рассматриваются компоновки затворных камер, режимы течения, гидродинамические нагрузки, действующие на затворы различных типов, даются оценки кавитационных явлений. Также в [1 – 4] обобщён опыт эксплуатации закрытых водосбросов и их гидравлических расчётов. Гидравлические экспериментальные исследования закрытых водосбросов в России и за рубежом рассмотрены в [5]. Вопросы подвода и транспорта воздуха на

тракте глубинных водосбросов изучены, например, в работе [6].

Анализ различных конструкций туннельных водосбросов, примененных на практике, представлен, например, в работе [7].

В последнее время за рубежом, в основном в Китае и Канаде, проводятся экспериментальные крупномасштабные и расчётные исследования условий работы плоских и сегментных затворов [8 – 14].

Разрушения на тракте закрытых водосбросов бывают весьма значительными, а их устранение требует дорогостоящего и длительного ремонта, как показано, например, в работе [15] для туннеля гидроузла Тарбела.

Экспериментальная установка и методика проведения исследований. Гидравлические исследования выполнены на модели масштаба 1:25, воспроизводящей затворную камеру строительного туннеля СТ4, состоящую из двух пролётов, разделенных промежуточным быком, а также подводящий напорный и отводящий безнапорный участки туннеля длиной около 80 м в натуре. Указанные участки туннеля выполнены из оргстекла с включением в конструкцию элементов сложной конфигурации, напечатанных на 3D-принтере. Подвод воды к модели из оргстекла выполнен с помощью металлической трубы диаметром 400 мм. Таким образом, длина подводящего участка составила более 8 диаметров этой трубы.

К особенностям рассматриваемой модели следует отнести установку механизмов, обеспечивающих установку плоского и сегментного затворов во всем диапазоне их частичных открытий.

Для измерения расхода воды на модели использовался прямоугольный мерный водослив с погрешностью измерений 1 – 2 %. Модель была оборудована пьезометрами, размещёнными на дне и потолке подводящего участка туннеля, а также на дне каждого пролёта затворной камеры и на дне отводящего безнапорного участка туннеля. Пьезометры размещены также на наружной поверхности обшивки сегментного затвора, на верховой и низовой гранях плоского затвора, а также на участке его нижнего скоса.

Погрешность измерений пьезометрами составляет 0,5 – 1,0 %.

В теле сегментного затвора предусмотрена установка датчиков пульсации давления Keller PA-2MiX-153, обеспечивающих измерение давлений до 0,5 бар. Погрешность измерений составляет 0,5 % от верхнего предела измерений. Частотный диапазон датчиков составляет 0 – 400 кГц. Эффективный диаметр приёмной мембраны — 0,004 м. Частота опроса датчиков при измерениях составляет 1 кГц.

Скорости потока воздуха в аэрационных трубах измерялись термоанемометром зондового типа TESTO 425 (погрешность $\pm (0,1 + 0,05V)$, где V — скорость воздуха). Вакуумы у потолка затворной камеры измерялись с помощью микроанометра МКВК-250-0.02 (погрешность измерения 0,02 %).

При проведении исследований, как обычно в гидротехнической практике, моделирование гидродинамических процессов при преобладающем действии сил тяжести осуществлялось по критерию Фруда, исходя из условий геометрического подобия [16, 17]. На модели числа Рейнольдса, естественно, снижаются при переходе от полного открытия затворов к частичному. Так при полном открытии затворов число Рейнольдса $Re = (V \cdot D)/\nu = (1,5 - 1,7) \cdot 10^6$, где V — средняя скорость в сжатом сечении за затвором; D — характерный размер; ν — кинематический коэффициент вязкости ($\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). При минимальном частичном открытии затвора, составляющем 20 % от полного, число Рейнольдса уменьшалось до $Re = (2,5 - 2,8) \cdot 10^5$.

Условие автомодельности при проведении исследований выполняется, так как числа Рейнольдса больше критических, составляющих по данным [16] $(1,5 - 2,0) \cdot 10^5$. Автомодельность при изучении потерь напора обеспечивается во всем диапазоне работы затворов, так как числа Рейнольдса существенно превышают $1,5 \cdot 10^5$ [18].

Кроме сил трения на характеристики потока на модели также оказывает влияние сила поверхностного натяжения, которая характеризуется числом Вебера $We = V/(\sigma/\rho h)^{1/2}$, где h — характерный линейный размер, ρ — плотность воды, σ — коэффициент поверхностного натяжения воды ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 0,073 \text{ кг с/м}$).

Числа Вебера на модели при частичном открытии затвора, составляющем 20 % от полного, составили около 180, а при полном открытии — увеличились до 480. Числа Вебера на модели превышают критические, равные 100 [19].

Таким образом, отмечено наличие автомодельности при изучении режима течения и аэрации потока в камере затворов на модели.

Исследования маневрирования сегментными затворами. Исследования выполнены для двух схем работы:

- при симметричном маневрировании сегментными затворами обоих пролётов, то есть при одинаковых их частичных открытиях;
- при полном открытии одного пролёта и частичных открытиях сегментных затворов другого.

Рассмотрены частичные открытия сегментного затвора n , составляющие 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 от полного его открытия.

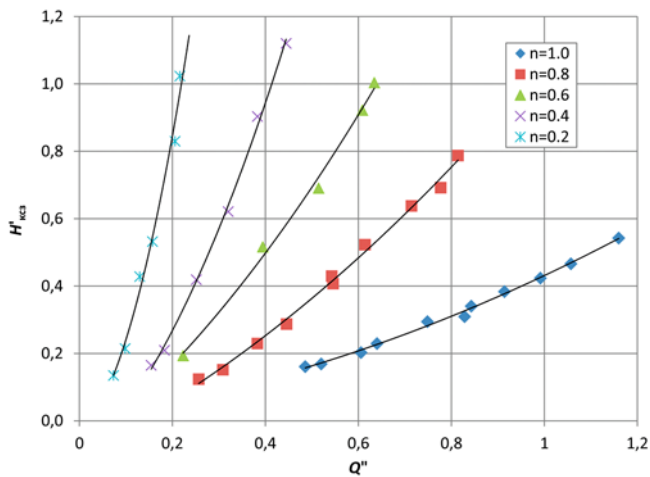


Рис. 2. Зависимости относительного напора перед камерой сегментных затворов от относительного расхода при частичных и полном открытии двух сегментных затворов

Расчётные расходы при работе двух и одного пролёта туннеля составляют $Q_{p2} = 1750 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{p1} = 875 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

Для изучения гидродинамического воздействия потока на затворы определяющим фактором является напор на камеру сегментных затворов $H_{кзз}$, который фиксировался непосредственно перед камерой. По данным о распределении осреднённых пьезометрических напоров для обеих схем работы сооружения построены графики зависимостей относительного напора $H'_{кзз} = H_{кзз}/H_p$ от относительных расходов $Q' = Q/Q_{p1}$ и $Q'' = Q/Q_{p2}$, которые по форме аналогичны графикам пропускной способности (рис. 2 и 3).

Анализ этих графиков показывает, что только в случае работы одного пролёта туннеля расчётный напор $H_{кзз}$ достигает 120 м во всём диапазоне частичных открытий и при полном открытии сегментного затвора. При работе двух пролётов, особенно с полными открытиями затворов, напор $H_{кзз}$ снижа-

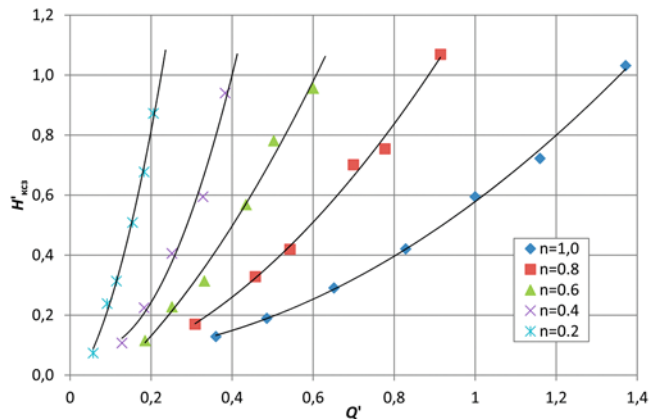


Рис. 3. Зависимости относительного напора перед камерой сегментных затворов от относительного расхода при частичных и полном открытии одного сегментного затвора

ется по сравнению с зафиксированным при открытии только одного пролёта (рис. 2, 3).

На основе результатов исследований для двух схем работы сооружения определены зависимости коэффициента сопротивления камеры сегментных затворов $\zeta_{кзз}$ (определенного по классической формуле Борда с использованием скорости потока в сечении из-под затвора) от числа Рейнольдса Re для каждого открытия затвора (рис. 4). Обобщение указанных данных позволяет определить значения коэффициентов $\zeta_{кзз}$ и $\zeta'_{кзз}$ (определенного по скорости потока в сечении перед камерой) при полных и частичных открытиях, как показано в табл. 1.

Данные табл. 1 о коэффициентах сопротивления ζ' , в общем, принципиально совпадают с результатами экспериментального определения таких коэффициентов в камерах сегментных затворов различных конструкций [5].

Пропускная способность туннеля СТ4 при полном и частичных открытиях сегментного затвора определяется по формуле:

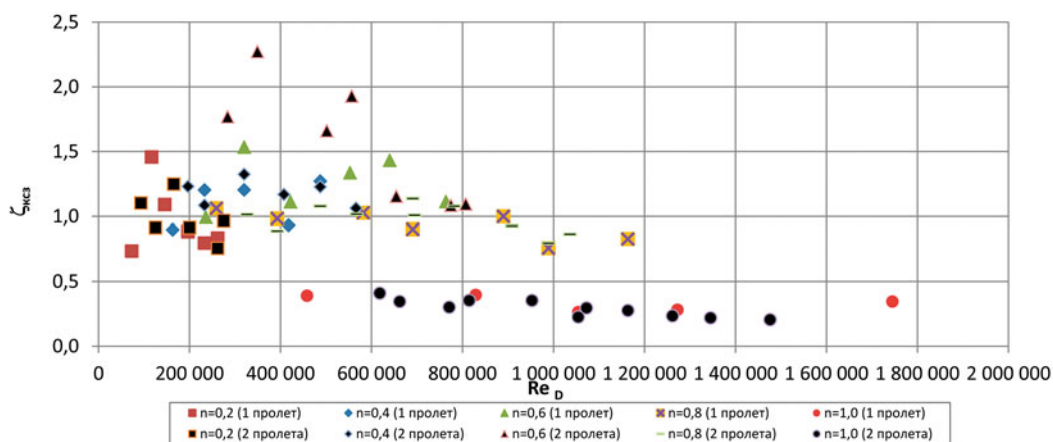


Рис. 4. Данные о коэффициенте сопротивления камеры сегментных затворов (определенного по скорости потока в выходном сечении) при частичных и полном открытии 1-го и 2-х пролётов

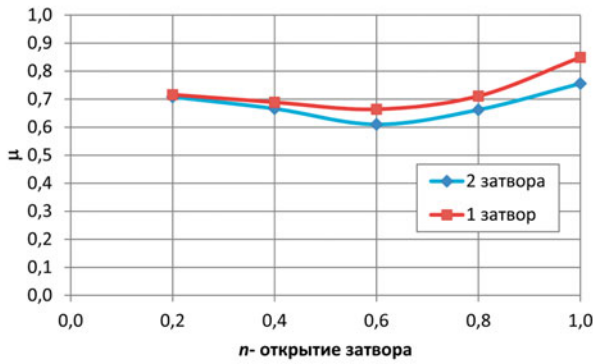


Рис. 5. Изменение коэффициента расхода туннеля СТ4 при частичных и полном открытии 1-го и 2-х сегментных затворов

$$Q = \mu \omega_p \sqrt{2gH'_p}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент расхода напорного участка туннеля; ω_p — общая площадь поперечного сечения отверстий камеры сегментных затворов; H'_p — действующий напор, определяемый как разность удельных энергий потока в верхнем бьефе и средней потенциальной энергии в сечении открытого отверстия в камере сегментных затворов.

Для расчётного определения пропускной способности туннеля СТ4 коэффициент его расхода μ определим по упрощённой формуле (2) с учётом сложения экспериментально определенных на рассматриваемой модели масштаба 1:25 коэффициентов сопротивления камеры сегментных затворов (табл. 1) и суммарного коэффициента сопротивления тракта туннеля СТ4 от верхнего бьефа до камеры сегментных затворов по данным экспериментальных исследований, выполненных авторами статьи во ВНИИГ на модели масштаба 1:40:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \Sigma \zeta}}, \quad (2)$$

Таблица 1

Коэффициенты сопротивления при частичных открытиях сегментных затворов

Открытие затворов, n	Открыт один затвор		2 затвора открыты симметрично	
	ζ	ζ'	ζ	ζ'
1,0	0,3	3	0,3	0,8
0,8	0,8	13	0,8	3,2
0,6	1,2	34	1,2	8,6
0,4	1,2	77	1,2	19,2
0,2	1,2	308	1,2	77,0

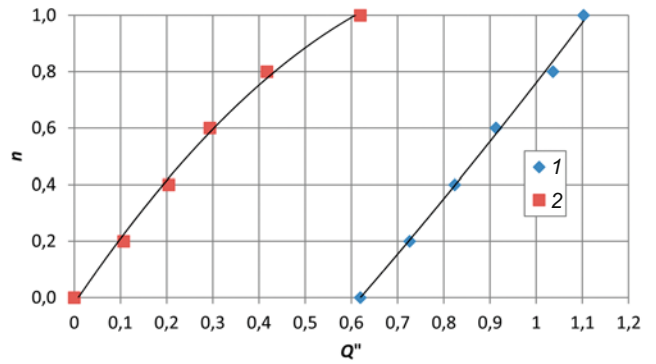


Рис. 6. Графики закрытия сегментных затворов:

1 — пролёт открыт, сегментный затвор 2-го пролёта закрывается; 2 — 1 пролёт закрыт, сегментный затвор 2-го пролёта закрывается

где $\Sigma \zeta$ — сумма коэффициентов сопротивлений, приведённых к площади поперечного сечения отверстий камеры сегментных затворов, определяемая по формуле:

$$\Sigma \zeta = \zeta_1 \left(\frac{\omega_p}{\omega_1} \right)^2 + \zeta_2 \left(\frac{\omega_p}{\omega_1} \right)^2 + \dots + \zeta_i \left(\frac{\omega_p}{\omega_1} \right)^2, \quad (3)$$

где ζ_i , ω_i — соответственно коэффициент сопротивления и площадь сечения на участке рассматриваемого сопротивления.

Результаты расчётов по описанному выше способу позволили определить коэффициент расхода. Зависимости изменения коэффициента расхода μ туннеля СТ4 при частичных и полном открытии 1-го и 2-х сегментных затворов представлены на рисунке 5. Для случаев работы 1-го и 2-х пролётов коэффициенты расхода, определенные по формуле (1), составили 0,85 и 0,76 соответственно. По этим коэффициентам получены кривые пропускной способности туннеля СТ4, то есть зависимости УВБ от сбросного расхода. Следует отметить, что при закрытии отдельных пролётов туннеля СТ4, исключении из работы одной ветки туннеля, потери напора на верховом напорном участке тракта уменьшаются из-за снижения сбросного расхода. Поэтому средние скорости течения в створе сегментного затвора при расчётном напоре 120 м увеличиваются и составляют 36 и 40 м/с при работе 2-х и 1-го пролёта соответственно. Указанное обстоятельство оказывает определяющее влияние на условия течения и кавитационную безопасность в камере сегментных затворов.

На основе обобщения результатов исследований получены представляющие интерес для практики графики закрытия сегментных затворов туннеля СТ4 для двух схем их работы при расчётном напоре 120 м (рис. 6).

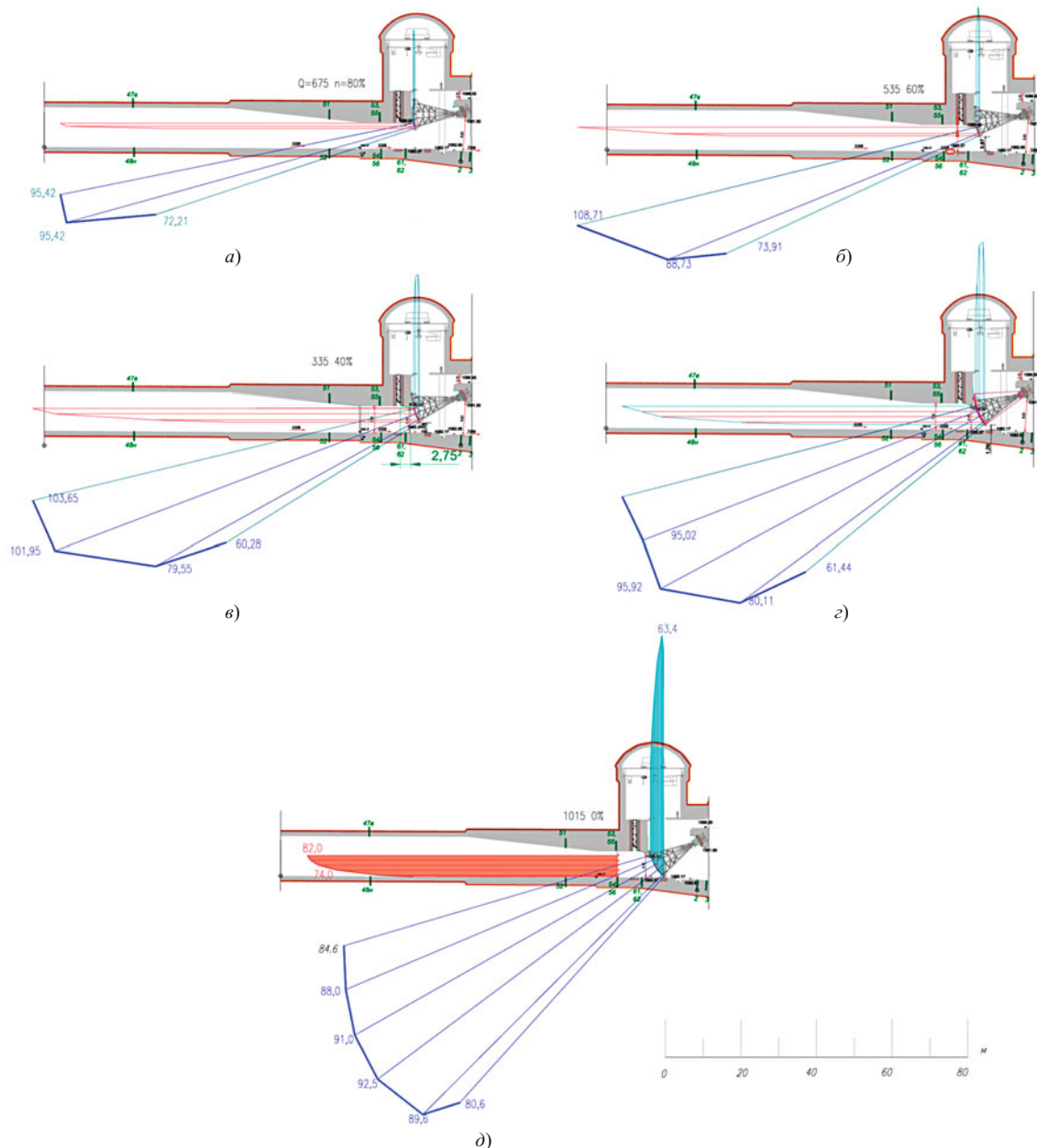


Рис. 7. Пример распределения осреднённых пьезометрических напоров, действующих на сегментный затвор: *a, б, в, г, д* — при открытиях затвора на 80, 60, 40, 20 % и при полном закрытии

Гидродинамическая нагрузка, действующая на сегментные затворы, определена при их частичных открытиях. Пример эпюр распределения осреднённых пьезометрических напоров $H_{\text{оср}}$, действующих на сегментный затвор в процессе его закрытия, представлен на рис. 7. Следует обратить внимание на достаточно равномерную эпюру осреднённых пьезометрических напоров по всей высоте затвора и на существенное уменьшение значений таких напоров вблизи низовой кромки затвора, что, по-видимому, может быть объяснено наличием здесь зоны отрыва потока.

Необходимо отметить, что осреднённые напоры на поверхности обшивки затвора $H_{\text{оср}}$, в среднем,

близки к напору на камеру сегментных затворов $H_{\text{кзз}}$.

По данным об осреднённых пьезометрических напорах, действующих на сегментный затвор и направленных в центр оси его вращения, могут быть расчётом определены горизонтальные и вертикальные его составляющие, как показано, например, на рис. 7, *д*.

Для изучения параметров гидродинамического воздействия на сегментный затвор для двух схем его работы выполнена статистическая обработка реализаций пульсации давления, зафиксированных датчиками. Анализ этих данных показал, что осреднённая составляющая гидродинамического давления существенно превышает его пульсационную

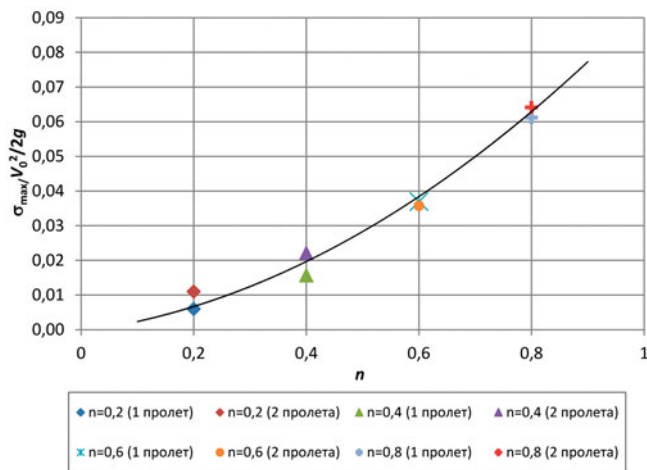


Рис. 8. Зависимости максимальных интенсивностей пульсации давления при частичных открытиях сегментного затвора

составляющую. Максимальные интенсивности пульсации пьезометрического напора $C'_p = \sigma_{\max}/V_c^2/2g$ возрастают при увеличении открытия затвора (рис. 8). Интенсивности пульсаций C'_p достигают 0,06 – 0,07 при открытии затвора $n = 0,8$, что несколько меньше, чем зафиксировано в гидравлическом прыжке, который характеризуется наибольшими значениями пульсаций давления при гашении энергии потока [1].

Анализ законов распределения пульсации пьезометрического напора показал, что он близок к нормальному, а максимальные амплитуды процесса A могут быть ориентировочно приняты равными 3σ . На основе этого соотношения получены максимальные мгновенные пьезометрические напоры.

Мгновенный гидродинамический напор может быть определен как сумма осреднённой и пульсационной его составляющих:

$$H' = H_{\text{оср}} + A. \quad (4)$$

Т а б л и ц а 2

Гидродинамические нагрузки на сегментный затвор при его частичных открытиях

Открыт один затвор			Два затвора открыты симметрично				
n	$P_{\text{ср}}, \text{МН}$	$P_{\text{гориз}}, \text{МН}$	$P_{\text{верт}}, \text{МН}$	n	$P_{\text{ср}}, \text{МН}$	$P_{\text{гориз}}, \text{МН}$	$P_{\text{верт}}, \text{МН}$
0,8	2,1	1,9	0,6	0,8	2,1	1,9	0,3
0,6	8,9	8,0	1,0	0,6	8,8	8,0	1,0
0,4	13,9	11,7	2,0	0,4	13,5	11,1	2,1
0,2	19,1	14,9	4,0	0,2	19,1	15,2	3,9
0	23,5	18,0	7,8				

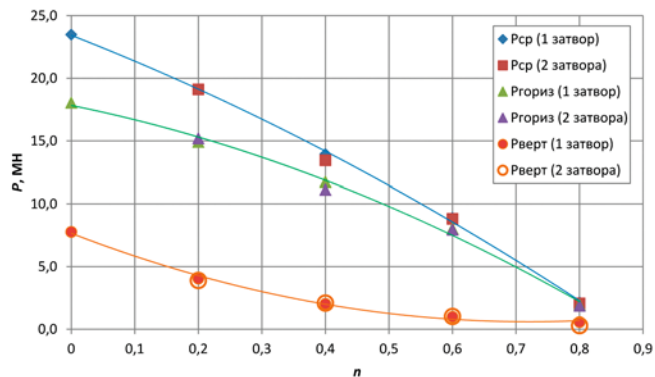


Рис. 9. Зависимости средних, горизонтальных и вертикальных составляющих гидродинамической нагрузки на сегментный затвор при его частичных открытиях

Средний гидродинамический напор на сегментный затвор определяется, как среднее из зафиксированных значений:

$$H_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^m H'_i}{m}, \quad (5)$$

где m — количество значений.

Суммарная гидродинамическая нагрузка на сегментный затвор, направленная в центр его оси вращения, определяется так:

$$P_{\text{ср}} = H_{\text{ср}} S \rho, \quad (6)$$

где S — площадь поверхности затвора, обтекаемая потоком, на которую действует гидродинамическая нагрузка, ρ — плотность жидкости.

При определении вертикальной составляющей этой нагрузки по формуле, которая аналогична (6), используем в качестве площади S — её проекцию на горизонтальную плоскость, а в качестве осред-

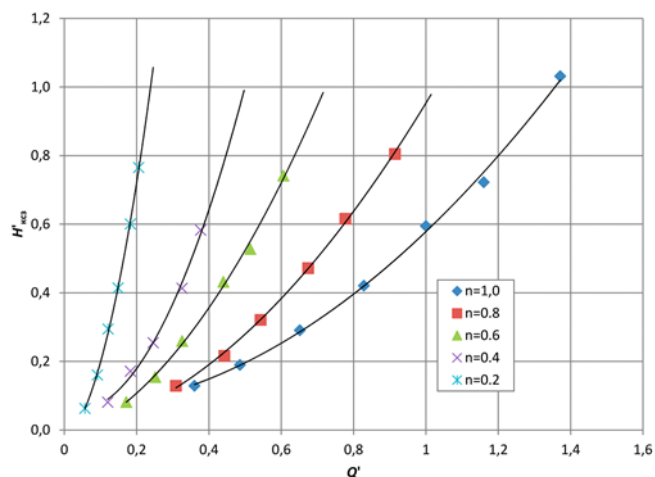


Рис. 10. Зависимости относительного напора перед камерой сегментных затворов от относительного расхода при частичных и полном открытии одного плоского затвора

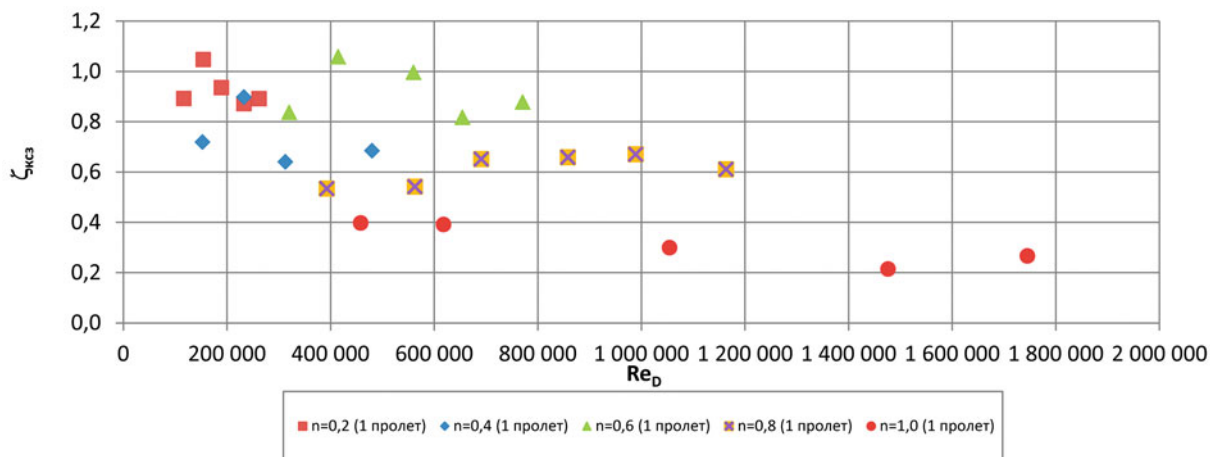


Рис. 11. Данные о коэффициенте сопротивления камеры сегментных затворов (определенного по скорости потока в выходном сечении) при частичных и полном открытии 1-го плоского затвора

нённого напора — его проекцию на вертикаль. Горизонтальную составляющую нагрузки определим аналогично.

Обобщённые данные о средних, горизонтальных и вертикальных составляющих гидродинамической нагрузки на сегментный затвор при его частичных открытиях представлены в таблице 2 и на графике рис. 9 для условий, когда УВБ = НПУ.

Анализ указанных данных свидетельствует, что в процессе закрытия сегментного затвора гидродинамические нагрузки, действующие на него, последовательно увеличиваются, достигая наибольших значений при полном закрытии. При закрытом затворе, когда пропуск расходов осуществляется через соседний пролёт при расчётном напоре 120 м, осреднённая гидродинамическая нагрузка достигает примерно 25,0 МН, а вертикальная — 8,0 МН (табл. 2).

Изучение процесса закрытия плоского затвора. Исследования по изучению процесса закрытия плоского затвора рассмотрены для двух последовательных схем работы:

- 1 пролёт туннеля открыт, плоский затвор другого пролёта открыт частично;
- 1 пролёт туннеля закрыт, плоский затвор другого пролёта открыт частично.

При проведении исследований рассмотрены частичные открытия плоского затвора n , составляющие 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 от полного его открытия.

Для изучения гидродинамического воздействия потока на плоские затворы, как и выше рассмотрено при исследованиях сегментных затворов, определяющим фактором является напор на камеру сегментных затворов $H_{кз}$. В основном при проведении исследований рассматривалась схема закрытия одного плоского затвора, когда другой пролёт полностью закрыт. По данным о распределении осреднённых пьезометрических напоров построен гра-

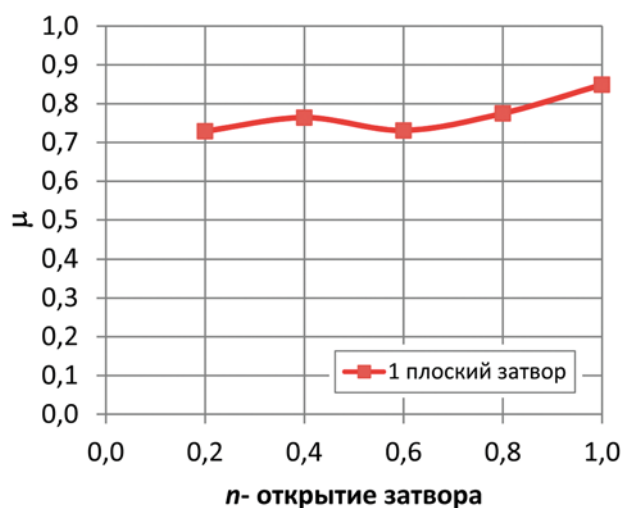


Рис. 12. Изменение коэффициента расхода туннеля СТ4 при частичных и полном открытии 1-го плоского затвора

фик зависимостей относительного напора $H'_{кз}$ от относительного расхода Q' (рис. 10). Анализ этого графика показывает, что во всём диапазоне рассмотренных частичных открытий затвора расчётный напор $H_{кз}$ несколько меньше 120 м.

На основе результатов исследований определены зависимости коэффициента сопротивления камеры сегментных затворов $\zeta_{кз}$ (определенного по скорости потока в сечении из-под затвора) от числа Рейнольдса для каждого открытия затвора (рис. 11). Обобщение указанных данных позволяет определить значения коэффициентов $\zeta_{кз}$ и $\zeta'_{кз}$ (определенных по скорости потока в сечении перед камерой) при полных и частичных открытиях, как показано в табл. 3.

Коэффициенты сопротивления, указанные в табл. 3 для плоского затвора, близки к определённым выше для сегментного затвора (табл. 1), а при полном их открытии, естественно, совпадают. Дан-

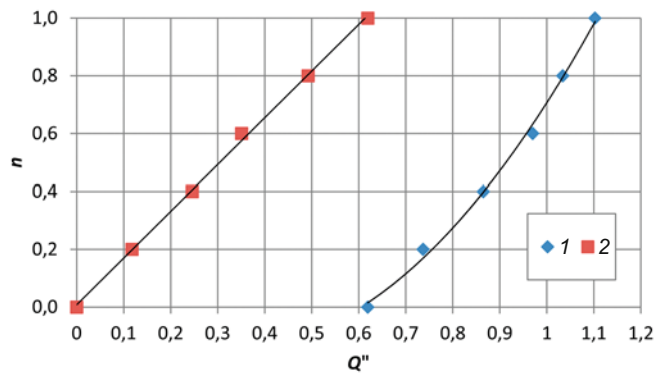


Рис. 13. Графики закрытия плоских затворов:

1 – 1 пролёт открыт, плоский затвор 2-го пролёта закрывается;
2 – 1 пролёт закрыт, плоский затвор 2-го пролёта закрывается

ные табл. 3 о коэффициентах сопротивления ζ' в общем принципиально совпадают с результатами экспериментального определения таких коэффициентов для плоских затворов различной формы [5].

Пропускная способность туннеля СТ4 при полном и частичных открытиях плоского затвора определяется расчётом по способу, который рассмотрен выше. Зависимость изменения коэффициента расхода μ туннеля СТ4 при частичных и полном открытии плоского затвора представлена на рис. 12. Коэффициенты расхода туннеля СТ4 в процессе закрытия одного плоского затвора несколько меньше, чем при закрытии сегментного затвора (сравните рис. 5 и 12).

На основе обобщения результатов исследований получены представляющие интерес для практики графики закрытия плоских затворов для двух схем их работы при расчётном напоре туннеля СТ4 120 м (рис. 13). Указанные графики аналогичны полученным выше в процессе закрытия сегментных затворов (рис. 6).

Гидродинамическая нагрузка, действующая на плоский затвор, определена при его частичных открытиях. Для плоского затвора для двух схем его работы определены горизонтальная и вертикальная составляющие этой нагрузки. Эпюра горизонталь-

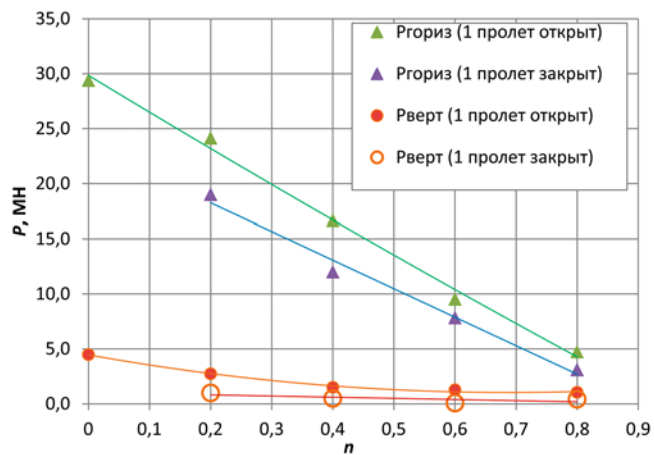


Рис. 14. Зависимости горизонтальных и вертикальных составляющих осреднённой нагрузки на плоский затвор при его частичных открытиях

ных осреднённых пьезометрических напоров достаточно равномерно распределена по высоте затвора, однако вблизи нижней кромки затвора они существенно уменьшаются. Максимальные значения горизонтальных осреднённых пьезометрических напоров $H_{оср}$ близки к напору на камеру сегментных затворов $H_{кэз}$.

Суммарные горизонтальные и вертикальные гидродинамические нагрузки на плоский затвор определены по формулам, которые аналогичны (5) и (6). Обобщение данных об этих нагрузках на плоский затвор при его частичных открытиях представлено в табл. 4 и на графике рис. 14 для условий, когда УВБ = НПУ.

Анализ указанных данных свидетельствует, что в процессе закрытия плоского затвора гидродинамические нагрузки, действующие на него, последовательно увеличиваются, достигая наибольших значений при полном закрытии. При закрытом затворе, когда пропуск расходов осуществляется через соседний пролёт при расчётном напоре 120 м, горизонтальная гидродинамическая нагрузка достигает примерно 30,0 МН, а вертикальная — 5,0 МН (табл. 4).

Таблица 3

Коэффициенты сопротивления при частичных открытиях плоского затвора при полном закрытии 2-го пролёта

Открытие затворов, n	ζ	ζ'
1,0	0,3	3
0,8	0,6	8
0,6	0,9	22
0,4	0,9	49
0,2	0,9	196

Таблица 4

Гидродинамические нагрузки на плоский затвор при его частичных открытиях

При полном открытии 2-го пролёта			При полном закрытии 2-го пролёта		
n	$P_{гориз}$, МН	$P_{верт}$, МН	n	$P_{гориз}$, МН	$P_{верт}$, МН
0,8	4,7	1,0	0,8	3,1	0,4
0,6	9,5	1,3	0,6	7,8	0,1
0,4	16,7	1,5	0,4	12,0	0,5
0,2	24,1	2,7	0,2	19,0	1,0

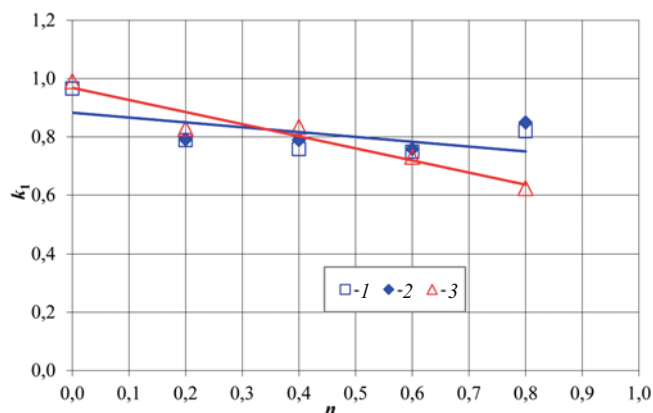


Рис. 15. Данные о коэффициенте k_1 при частичных открытиях сегментного и плоского затворов:

1, 2 — при частичных открытиях сегментных затворов при симметричном и полном открытии второго пролёта соответственно; 3 — при частичных открытиях плоского затвора, когда второй пролёт закрыт

Сравнение данных о нагрузках, зафиксированных для сегментного и плоского затворов, показывает их примерное соответствие (сравните табл. 2 и 4). При полном закрытии затвора, когда пропуск расходов осуществляется через соседний пролёт, наибольшая горизонтальная нагрузка действует на плоский затвор, а наибольшая вертикальная — на сегментный.

Как уже указывалось выше, для сегментного и плоского затвора осреднённые напоры на поверхности затвора $H_{оср}$ в среднем близки к напору на камеру сегментных затворов $H_{кз3}$. Соотношение между средним гидродинамическим напором на затвор $H_{ср}$ и напором $H_{кз3}$ позволяет определить коэффициент $k_1 = H_{ср}/H_{кз3}$. Указанный коэффициент k_1 по форме представляет собой коэффициент силы, так как позволяет определить гидродинамическую нагрузку на затвор с использованием осреднённого пьезометрического напора и геометрических параметров затвора. Графики зависимости коэффициента k_1 в процессе закрытия затвора приведены на рис. 15. Для обоих затворов при частичных открытиях затвора коэффициент k_1 составляет 0,75 – 0,85, а при полном их закрытии становится примерно равным 1,0 (рис. 15).

Определение условий аэрации потока в камере сегментных затворов. Для аэрации потока, отбрасываемого из напорного участка в камеру сегментных затворов, предусмотрен специальный аэрационный туннель. Подвод воздуха к потоку, выходящему из концевой створа напорного участка туннеля, осуществляется через паз-аэратор, устроенный на дне и боковых стенах камеры сегментных затворов (рис. 1). Воздух свободно поступает к потоку по всему его периметру и обеспечивает достаточную его аэрацию, которая, в свою очередь, яв-

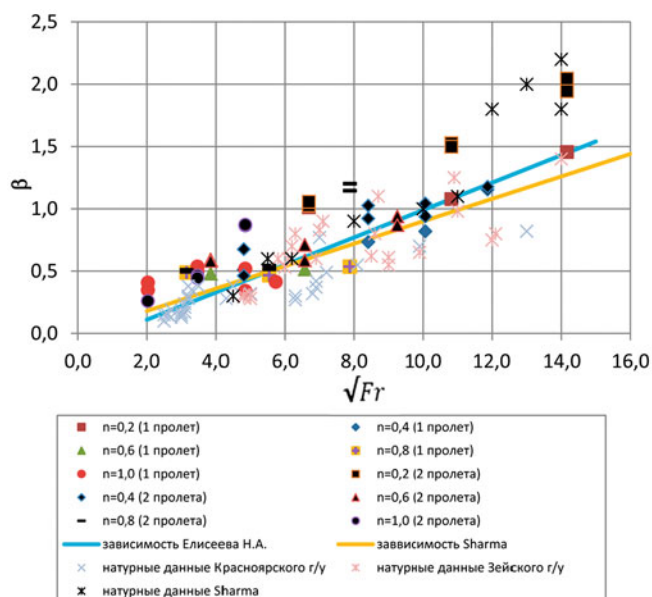


Рис. 16. Зависимости относительного расхода воздуха, поступающего в камеру сегментных затворов, от числа Фруда в случаях работы 1 и 2 пролётов при полном и частичных открытиях сегментных затворов

ляется эффективным фактором для снижения опасности кавитационной эрозии.

В результате исследований, выполненных в основном при маневрировании сегментными затворами для двух схем их работы, установлено, что относительный расход воздуха по отношению к сбросному расходу воды через один пролёт $Q_{в1} - \beta = Q_{а1}/Q_{в1}$ увеличивается с ростом числа Фруда Fr (рис. 16). При частичных открытиях затвора расходы воздуха, поступающие в камеру сегментных затворов, закономерно снижаются, а коэффициент β достигает 2,0 при небольших частичных открытиях сегментного затвора. При полном открытии сегментного затвора и работе туннеля при расчётном напоре этот коэффициент снижается примерно до 0,5 (рис. 16).

Данные модели подтверждаются сравнением результатов определения расхода воздуха, поступающего к потоку, с натурными данными, полученными на Красноярском и Зейском гидроузлах [5], строительные водосбросы которых имеют аналогичную конструкцию камер сегментных затворов (рис. 16). По результатам отечественных натурных и модельных исследований построена зависимость Н. А. Елисеева [5], которая показывает значения расходов воздуха несколько меньшие, чем зафиксированы в рассматриваемых исследованиях (рис. 16). Натурные данные Шарма [6] в общем близки к рассматриваемым результатам модельных исследований.

По данным рис. 16 могут быть определены наибольшие расходы воздуха, которые поступают к одному пролёту камеры сегментных затворов. Для

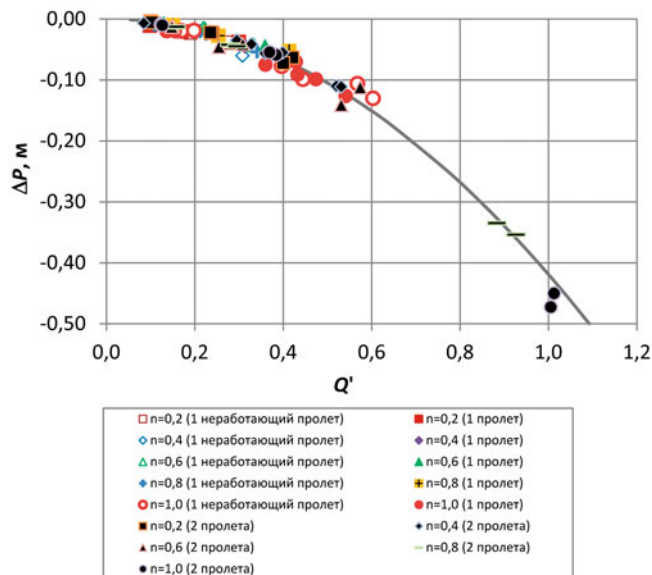


Рис. 17. Зависимости вакуума у потолка камеры сегментных затворов от расхода воздуха, поступающего в эту камеру, в случаях работы 1 и 2 пролётов при полном и частичных открытиях сегментных затворов

туннеля СТ4 эти расходы достигают $900 \text{ м}^3/\text{с}$ при полном открытии сегментных затворов и работе сооружения при расчётном напоре 120 м. Суммарный расход, подводимый к обеим камерам туннеля СТ4, составит $3600 \text{ м}^3/\text{с}$, т.е. практически будет соответствовать расчётному расходу туннеля. Скорости воздуха в аэрационном туннеле достигнут $40 - 50 \text{ м/с}$. Такие скорости воздуха допустимы [2].

Вакуум у потолка камеры сегментных затворов, обеспечивающий транспорт воздуха к потоку, достигает примерно $0,5 \text{ м вод. столба}$ ($5,0 \text{ КПа}$) при полных открытиях сегментных затворов и расчётном напоре (рис. 17). Следует отметить и образование вакуума у потолка камеры и в створе закрытого

пролёта туннеля, значения которого близки к зафиксированным над открытым сегментным затвором (рис. 17).

При проведении исследований для двух схем маневрирования сегментными затворами установлен коэффициент расхода аэрационных водоводов, подводящих воздух к камере сегментных затворов. Это коэффициент расхода μ_a составил примерно $0,85$ при числах Рейнольдса Re_{Da} больших $(3,0 - 4,0) \cdot 10^4$ (рис. 18).

Методика определения гидродинамических нагрузок. На основе обобщения результатов исследований составлена методика выполнения гидравлических расчётов по определению гидродинамических нагрузок на плоский и сегментный затвор в процессе их закрытия.

Исходными данными являются геометрические параметры туннеля, оборудованного двух-пролётной затворной камерой аналогичной конструкции сегментного и плоского затворов, а также расчётные напор H_p и расход Q_p на сооружении.

Для определения гидродинамических нагрузок при полном и частичных открытиях плоского или сегментного затвора используем следующую последовательность расчётов:

1. Определяем коэффициент сопротивления камеры сегментных затворов ζ , приведённый к выходному сечению напорного участка туннеля, с использованием данных табл. 1 для сегментного затвора и табл. 3 для плоского затвора.

2. Выполняем построение напорной линии в пределах камеры сегментных затворов с использованием коэффициента сопротивления ζ . Определяем напор на входе в камеру сегментных затворов $H_{квз}$.

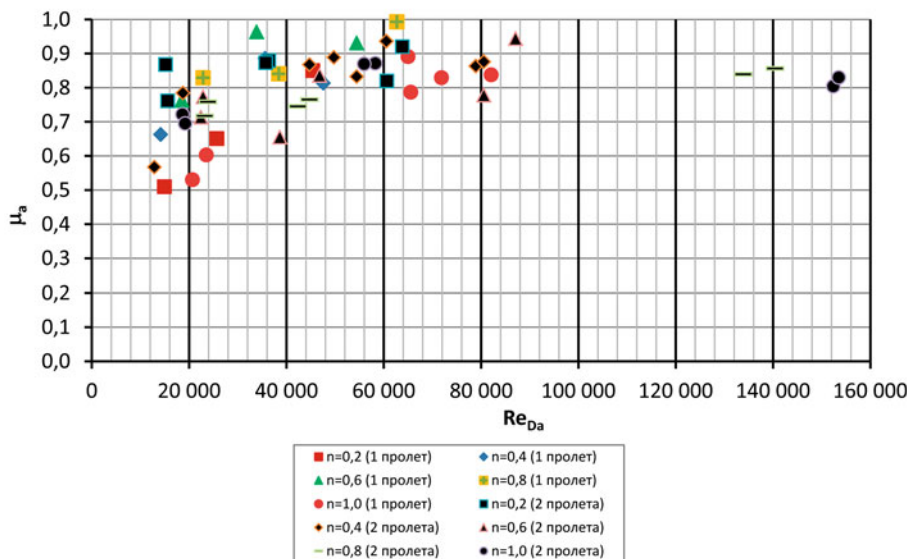


Рис. 18. Данные о коэффициенте расхода аэрационного водовода от числа Рейнольдса в случаях работы 1 и 2 пролётов при полном и частичных открытиях сегментных затворов

3. Определяем пропускную способность туннеля по формуле (1), когда коэффициент расхода μ подсчитывается по формуле (2), а суммарный коэффициент расхода $\Sigma\zeta$, нормированный площадью выходного сечения в сечении под затвором, определён по формуле (3).

4. Принимаем коэффициент k_1 , показывающий соотношение между средним гидродинамическим напором на затвор и напором на камеру сегментных затворов, по данным рисунка 15. Коэффициент k_1 с запасом принимаем равным 1,0.

5. Определяем суммарную гидродинамическую нагрузку по формуле (6), используя вместо значения $H_{ср}$ полученный напор на входе в камеру $H_{квз}$ и умножив полученный результат на коэффициент k_1 .

6. Подсчитываем горизонтальные и вертикальные составляющие гидродинамической нагрузки, исходя из стандартных геометрических соображений.

Выводы

1. Выполнено гидравлическое обоснование конструкции затворной камеры строительного туннеля СТ4 Рогунской ГЭС, расположенной на выходе из напорного участка этого туннеля, оборудованной рабочими сегментными и плоскими аварийно-ремонтными затворами, рассчитанной на пропуск расходов при напорах до 120 м.

2. На крупномасштабной физической модели получены экспериментальные данные о пропускной способности туннеля, о гидродинамических нагрузках, действующих на сегментные и плоские затворы в процессе их последовательного закрытия вплоть до постановки на порог, а также о расходах воздуха, подводимых к затворной камере для обеспечения аэрации потока.

3. Обобщение экспериментальных данных позволяет обосновать основные размеры камеры сегментных затворов, определить гидродинамические нагрузки на плоские и сегментные затворы, необходимые для расчёта управляющих ими гидроприводов и других конструкций, обеспечивающих их надёжную эксплуатацию, а также оптимизировать конструкции для аэрации потока.

4. Разработанная методика выполнения гидравлических расчётов может быть использована при проектировании аналогичных туннельных водосбросов.

Соблюдение этических норм

Конфликт интересов: авторы не заявляют о каких-либо конкурирующих интересах, имеющих отношение к содержанию данной статьи.

Финансовые интересы: у авторов нет соответствующих финансовых или нефинансовых интересов.

Список литературы

1. *Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений.* Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. *Рекомендации по компоновке затворных камер и расчётам гидродинамических воздействий потока на плоские, сегментные и дисковые затворы гидротехнических сооружений:* П84-79 / ВНИИГ — Л.: 1980. — 124 с.
3. *Рекомендации по учёту кавитации при проектировании водосбросных гидротехнических сооружений:* П38-75 / ВНИИГ — Л.: 1976. — 130 с.
4. *USBR. Cavitation in Chutes and Spillways.* A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph. 1990, April, № 42.
5. *Швайништейн А. М.* Глубинные водосбросы гидроузлов. — СПб: Изд-во АО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, 2017. — 338 с.
6. *Sharma H. R.* Air-entrainment in high head gated conduits. *Journal of Hydraulic Engineering*, 102 (HY11), 1630 – 1645, 1976.
7. *Илюшин В. Ф., Дубинчик Е. И.* Высоконапорные подземные водосбросы. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 104 с.
8. *Daneshmand F., Adamowski J., Liaghat T.* Bottom outlet dam flow: physical and numerical modelling. *Water Management*. V. 167, Issue WM3, p. 176 – 184. 2014.
9. *Novak G., Mlacnik J., Bombac M., Vosnjak S.* Hydrodynamic forces during the operation of a model radial gate. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, p. 1 – 9. 2016.
10. *Lee S. O., Seong H., Kang J. W.* Flow-induced vibration of a radial gate at various opening heights. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. V. 12, N. 1, p. 567 – 583. 2018.
11. *Faridmehr I., Nejad A. F., Baghban M. H., Ghorbani R.* Numerical and Physical Analysis on the Response of a Dam’s Radial Gate to Extreme Loading Performance. *Water*, 12, 2425. 2020.
12. *Wang Y., Xu G., Li W., Liu F., Duan Y.* Characteristics of Plane Gate Vibration and Holding Force in Closing Process by Experiments. *Appl. Sci.*, 10, 6111. p. 1 – 16. 2020.
13. *Wang X., Lian J.* Numerical Investigation on Air-Water Two-Phase Flow of Jinping-I Spillway Tunnel. *Appl. Sci.*, 12, 4311. p. 1 – 15. 2022.
14. *Mirabi M. H., Jabbari E., Rajaei T., et al.* Experimental investigation of turbulent flow in a rectangular bonneted slide gate and eliminating random fluctuating loads. *Phys. Fluids* 35, p. 1 – 18. 2023.
15. *Kenn M. J., Garrod A. D.* Cavitation damage and the Tarbela Tunnel collapse of 1974. *Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1*, 1981, 70, Nov., p. 779 – 810.
16. *Ляхтер В. М., Прудовский А. М.* Гидравлическое моделирование. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
17. *Леви И. И.* Моделирование гидравлических явлений. — Л.: Энергия, 1967. — 235 с.
18. *Альтигуль А. Д., Киселев П. Г.* Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). Учебное пособие для вузов. Издание 2. — М.: “Стройиздат”, 1975. — 323 с.
19. *Chanson H.* The hydraulics of stepped chutes and spillways, 2002, 384 p.