

М.С. ПАЛИИВЕЦ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КВАДРАТНОГО ВОДОВЫПУСКА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ

В статье рассматривается гидравлический расчет пропускной способности квадратного водовыпуска при регулировании и без регулирования на основе экспериментальных исследований. По экспериментальным данным построен график пропускной способности в безразмерных координатах H/d_2 и $\theta = \frac{Q}{\omega\sqrt{gd_2}}$, где H – напор воды в верхнем бьефе над порогом входа в водовыпуск; Q и θ – соответственно расход и безразмерный параметр расхода; ω – площадь поперечного сечения водовыпуска; g – ускорение силы тяжести. Перерасчет безразмерного параметра расхода в абсолютную величину расхода для гидравлического диаметра водовыпуска d_2 , $Q = f(\theta)$, может быть произведен по представленным в статье графикам и зависимостям. Пропускная способность сооружения при напорном режиме с неподтопленным истечением на выходе определена в результате построения по опытным данным графика зависимости $\frac{H}{d_2} = f(\theta^2)$ по методике Н.П. Розанова. В статье приводятся графики зависимостей и формулы коэффициента расхода μ от относительного напора перед водовыпуском h_1 и за ним h_2 , которые позволяет производить гидравлический расчет. Сформулированы рекомендации по применению и использованию таких местных сопротивлений, как затворы, размещаемые в концевой части водовыпуска при регулировании расхода.

Водовыпуск, гидротехническое сооружение, водопропускные сооружения, напорный короткий трубопровод, гидравлический диаметр по площади, расход, пропускная способность, коэффициент расхода.

Введение. В водопропускных сооружениях, таких как водоспуски, водовыпуски (глубинного, закрытого типа), а также водопропускные трубы прямоугольные дюкеры (трубчатые проезды) или водопропускные сооружения для целевых попусков воды из водохранилищ или канала или организованного выпуска воды проводятся по известным в гидравлике сооружений зависимостям.

Гидравлический расчет пропускной способности водоспуска (водовыпуска) дает такие поперечные размеры водопропускного сооружения, которые обеспечивают необходимую пропускную способность водовыпуска. В гидравлическом отношении рассматриваемый водовыпуск всегда представляет собой одну, две или несколько напорных

коротких труб: напорных труб, при расчете которых по формулам гидравлики необходимо учитывать как местные потери напора, так и потери по длине трубопровода.

Расчетный расход, проходящий через водовыпуск, выбирают либо по данным графика водопотребления, либо в зависимости от желаемого опорожнения водохранилища.

При расчете хозяйственных водоспусков (глубинного, закрытого типа) учитывается отметка уровня мертвого объема (самый низкий уровень воды в водохранилище), при котором потребителю подается максимальный расход водопотребления Q_p и в качестве расчетного уровня воды берется отметка УМО. Расчетным случаем является случай, когда учитывается максимальный

расход водопотребления и расчетный уровень воды в верхнем бьефе, когда затворы водоспуска должны быть полностью открыты.

В других случаях, когда пропускаемый расход воды равен расчетному или меньше расчетного, или уровень верхнего бьефа выше уровня мертвого объема, то затворы водоспуска должны прикрывать отверстия водовыпуска или регулироваться [1].

В других случаях, когда расход меньше расчетного или уровень верхнего бьефа выше уровня мертвого объема затворы водоспуска должны прикрывать отверстия.

При наличии двух параллельных труб (что обычно и имеет место) каждую трубу рассчитывают на пропуск расчетного расхода Q_p , равного: а) в случае подачи воды на орошение земель $Q_p = 0,5 Q_p$; б) в случае водоснабжения тех или других объектов $Q_p = 0,8 Q_p$, где Q_p – расчетный расход всего водоприемника. Принимая Q_p согласно этим формулам, имеем в виду, что во время ремонта одной из двух имеющихся труб потребителю не будет даваться соответственно 50 и 20% потребного ему расхода воды [1].

При гидравлических расчетах водоспуска используют два метода: расчет его пропускной способности по коэффициенту расхода и расчет сопряжения бьефов за водоспуском [1].

При расчете пропускной способности водовыпуска получают поперечные размеры водопропускного тракта, которые обеспечивают необходимый пропуск расхода (пропускную способность), в этом случае водовыпуск представляет собой одну или несколько напорных коротких трубопроводов (труб), при расчете которых учитывают потери напора по длине всего водопроводящего тракта, а также местные потери напора в нем.

При этом отличают два случая работы рассматриваемой напорной трубы: истечение воды в атмосферу (рис. 1); истечение под уровень воды в нижнем бьефе [1].

Гидравлический расчет выполняют следующим образом: а) задают среднюю скорость движения воды в трубе, равную $V = 2...5$ м/с; б) находят площадь сечения трубы ω , при этом устанавливают диаметр трубы d и принимают, округляя найденное его значение до сортаментной величины или размера прямоугольного сечения трубы – d (гидравлический диаметр по площади при этом равен – $d_r = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}}$); в) далее

по формуле (1), приведенной ниже для расчетного расхода Q_p определяют Z ; г) получив Z , определяют или высотное положение выходного отверстия трубы (при истечении в атмосферу), или необходимую отметку уровня воды нижнего бьефа.

Гидравлически водовыпуск представляет собой напорный водовод с расходом [1, 2, 3, 4]:

$$Q_p = \mu \omega \sqrt{2gZ}. \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода, учитывающий потери в водоводе; ω – площадь поперечного сечения водовыпуска; g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с²; Z – разность уровней перед водовыпуском и за ним.

Если отметка уровня воды в нижнем бьефе известна (высотное положение отводящего канала зафиксировано), то тем самым задано и значение Z . При таких условиях гидравлическую задачу решают методом подбора, при котором задаются рядом различных поперечных размеров трубы.

В случае если водоприемник состоит из напорного и безнапорного водоводов, то для гидравлического расчета пропускной способности напорной части трубы требуется знать отметку уровня нижнего бьефа. Для нахождения этой отметки УНБ строят свободную поверхность потока в безнапорном водоводе. Часто в этом водоводе бурный режим: гидравлический прыжок будет отогнан за пределы водовыпуска. В этом случае, если безнапорный водовод не очень длинный и значение Z не очень большое, в конце водовыпуска скорости такие же, как и при истечении воды из напорной трубы в атмосферу [1].

Поэтому при расчете водовыпуска требуется учитывать параметры водовыпуска, гидравлические режимы работы, коэффициент расхода для повышения точности гидравлического расчета, что является **актуальной задачей** обеспечения надежности и безопасности работы гидротехнических сооружений, основанных на поиске водовыпусков, способных пропускать заданный расчетный расход.

Материал и методы исследований.

В лаборатории кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики были выполнены гидравлические исследования квадратной конструкции устраиваемого в качестве водовыпуска, регулирующего, подпорного или дорожного сооружения на оросительной сети (рис. 1).



Рис. 1. Гидравлическая модель квадратного водовыпуска

Гидравлические исследования производились с водопроводящей трубой, поперечное сечение которой имело размер $d \cdot d = 0,085 \cdot 0,085 = \text{м}$, длина водопроводящей части изменялась в пределах $l = (10 \dots 22) d$, замеры потерь напора производились на участке $l = 20,7d$, труба работала как напорная, напор на входе определялся по формуле $H > 1,4d$, где d – высота входного сечения трубы.

Основной вопрос проведенных экспериментальных исследований – изучение гидравлических режимов и пропускной способности сооружения.

В начале проведения каждого опыта из серий опытов производился замер температуры воды в напорном баке с помощью ртутного термометра с минимальной шкалой $0,5^\circ\text{C}$, диапазон температур в летнее и зимнее время колебался от 12 до 17 градусов Цельсия.

Гидравлическая модель исследуемого сооружения состояла из: входного оголовка; водопроводящей части – горизонтально уложенной трубы из органического стекла квадратного сечения; выходной части с затворами со степенью закрытия $a/d = 0,1 \div 0,4$ (рис. 2) – выпуск воды в атмосферу.

Расход воды, проходящий через водовод, измерялся мерным треугольным водосливом Томсона, для которого имелась тарировочная кривая связи расхода с отметкой воды над водосливом. Точность отсчета $0,1 \text{ мм}$.

После стабилизации уровней воды в напорном баке снимались показания пьезометров, которые были установлены на верхней стенке модели.

На гидравлической модели измерялись потери по длине для оценки эквивалентной гидравлической шероховатости материала

стенок модели (органическое стекло), которая была определена экспериментальным методом и составила – $D_s = 0,03 \text{ мм}$ [5], что позволило моделировать бетонный водовыпуск квадратного сечения линейном масштабе 1:10. Масштаб моделирования распространялся не только на геометрические размеры сооружения, но и на эквивалентную гидравлическую шероховатость стенок водовыпуска.

Результаты и обсуждение. Поскольку в изучаемом водовыпуске местным сопротивлением являлись затворы (односторонние и двусторонние), необходимо было проверить условия воспроизводимости эксперимента. Зависимости коэффициентов сопротивления и расхода от перемещения клапана затворов известны. Проверка заключалась в сравнении данных, полученных при гидравлических исследованиях с результатами исследований Б.И. Яньшина, которые опубликованы в научной литературе по аналогичным типам затворов, расположенных в квадратной трубе диаметром $d = 150 \times 150 \text{ мм}$ [6, 7].

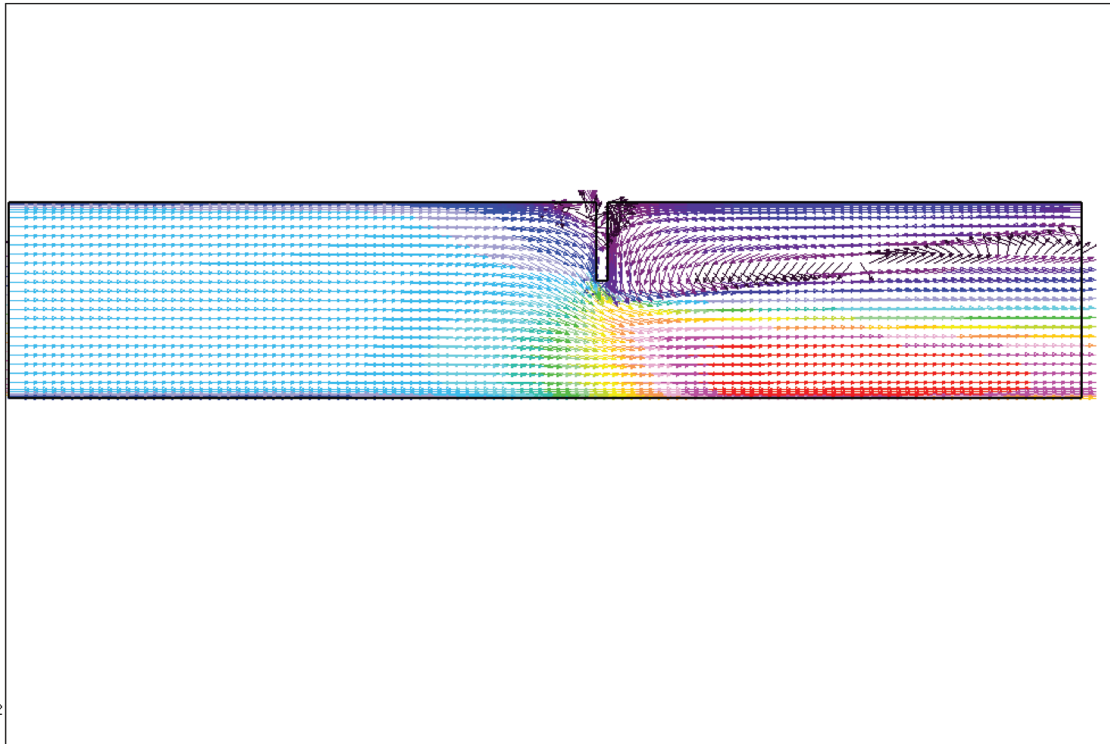
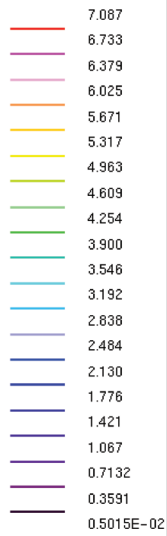
Сравнение коэффициентов местных сопротивлений обоих типов затворов для диапазона чисел Рейнольдса $Re = (1 \div 3) \cdot 10^5$ при степенях закрытия $a/d = 0,1, 0,4$ показали хорошее совпадение с данными Б.И. Яньшина, следовательно, эксперимент был выполнен в условиях воспроизводимости [8].

Точность измерений оценивалась в соответствии с ГОСТ Р ИСО [9]. Эксперимент выполнен в условиях повторяемости. Ошибка определения коэффициента расхода вычислена как для косвенно измеряемой величины с учетом систематической и не исключенной случайной составляющей. Суммарная относительная ошибка определения коэффициента расхода водовыпуска, соответствующая доверительной вероятности $0,95$, соответствовала $1 \div 1,2\%$.

По экспериментальным данным построен график пропускной способности водовыпуска, показанный на рисунке 3, в безразмерных координатах H/d_r и $\theta = \frac{Q}{\omega \sqrt{gd_r}}$, где H – напор воды в верхнем бьефе над порогом входа в водовыпуск; Q и θ – соответственно расход и безразмерный параметр расхода; ω – площадь поперечного сечения водовыпуска; g – ускорение силы тяжести. Перерасчет безразмерного параметра расхода в абсолютную величину расхода для гидравлического диаметра водовыпуска d_r , $Q = f(\theta)$, может быть произведен по графику, приведенному на рисунке 4.



Векторное поле скоростей, м/с



Векторное поле скоростей, м/с

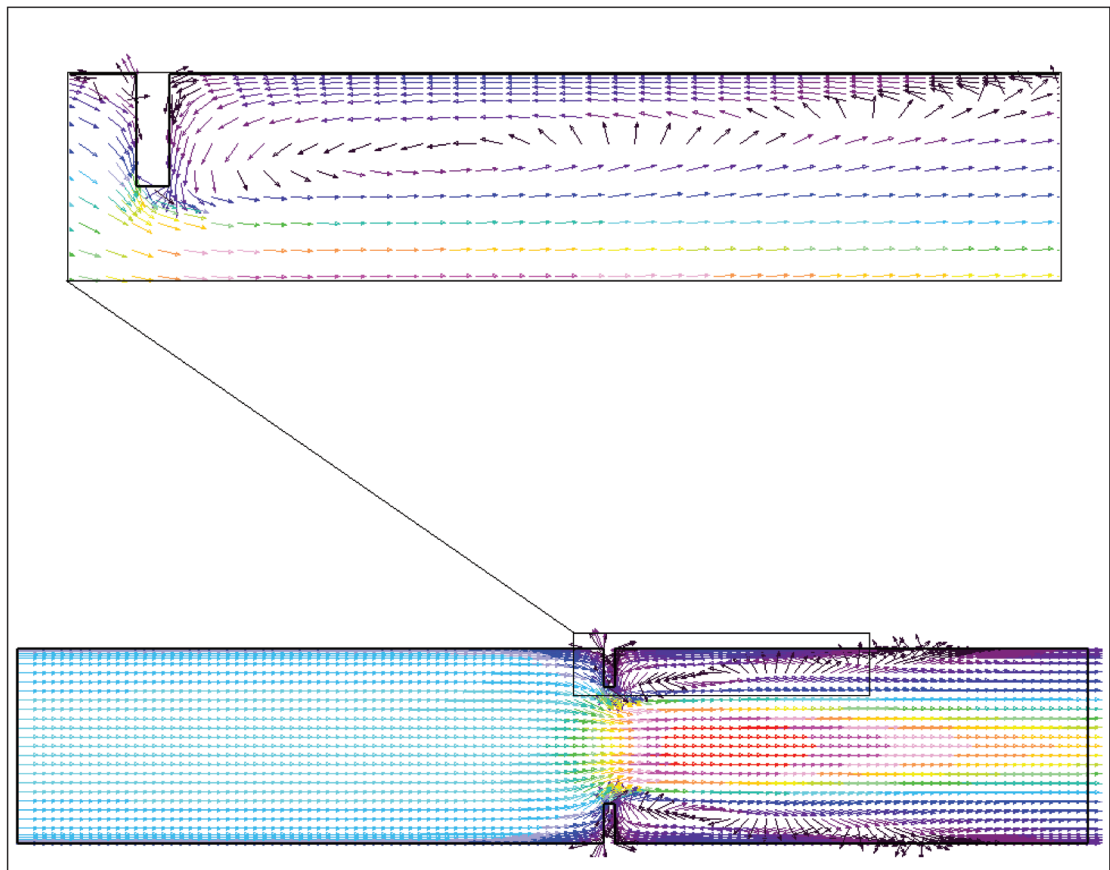
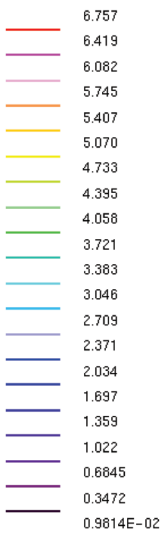


Рис. 2. Регулирование расхода водовыпуска a/d со степенью закрытия затворов $a/d = 0,1 \div 0,4$

Научная новизна. В исследованиях других авторов имеются данные по гидравлическим расчетам пропускной способности сооружений с горизонтальными цилиндрическими трубами [10, 11], но таких

данных для труб квадратного поперечного сечения нет. Научная новизна заключается в определении пропускной способности рассматриваемого квадратного водовыпуска при регулировании затворами со степенью

закрытия затворов $a/d = 0,1 \div 0,4$ и без регулирования, который способен пропускать заданный расчетный расход. В работе приводится график зависимости коэффициента расхода μ от относительного напора перед водовыпуском h_1 и за ним h_2 (рис. 4), который позволяет производить привязку к бьефам при гидравлическом расчете.

Также получены зависимости изменения коэффициента расхода от относительного

напора h_1/h_2 , которые имеют хорошие статистические оценки по коэффициенту детерминации $R^2 = 0,9396$ и $R^2 = 0,9668$:

$$\mu = 1,5711 \cdot \frac{h_1}{h_2} + 0,3418, \quad (2)$$

и

$$\mu = 1,4184 \cdot \frac{h_1}{h_2} + 0,3954. \quad (3)$$

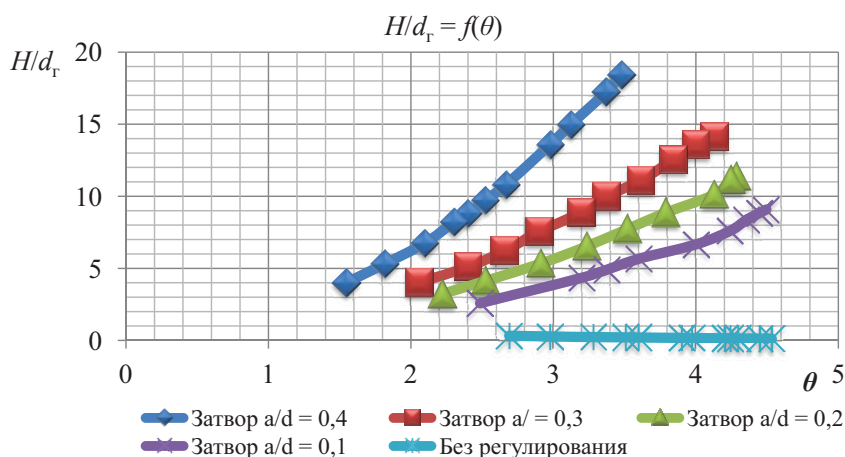


Рис. 3. График пропускной способности водовыпуска

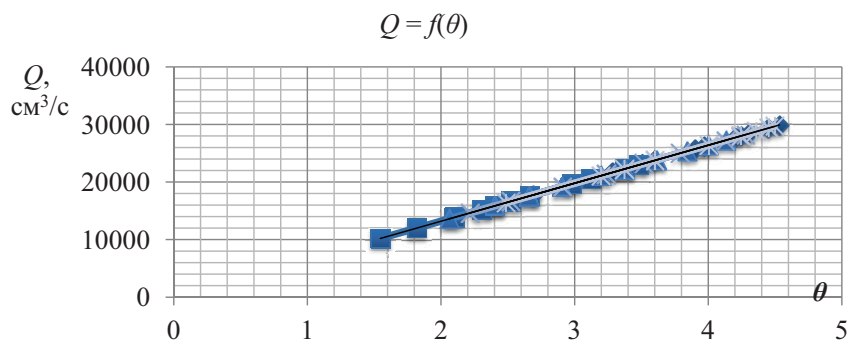


Рис. 4. График зависимости $Q = f(\theta)$

для гидравлического диаметра водовыпуска $d_r = 0,085$ м при регулировании

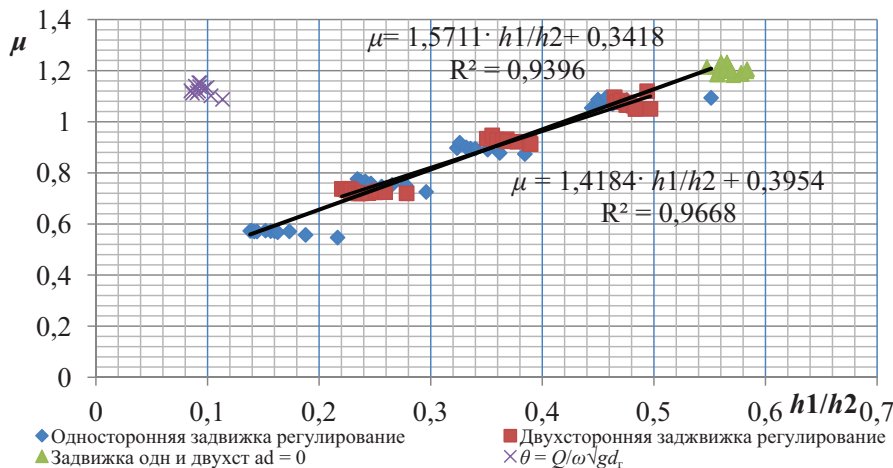


Рис. 5. График зависимости коэффициента расхода от относительного напора h_1/h_2 : h_1 — напор перед водовыпуском; h_2 — напор в концевой части водовыпуска

Пропускная способность сооружения при напорном режиме с неподтопленным истечением на выходе определена в результате построения по эксперимен-

тальным данным графика зависимости $\frac{H}{d_r} = f(\theta^2)$ по методике Н.П. Розанова [11] (рис. 6):

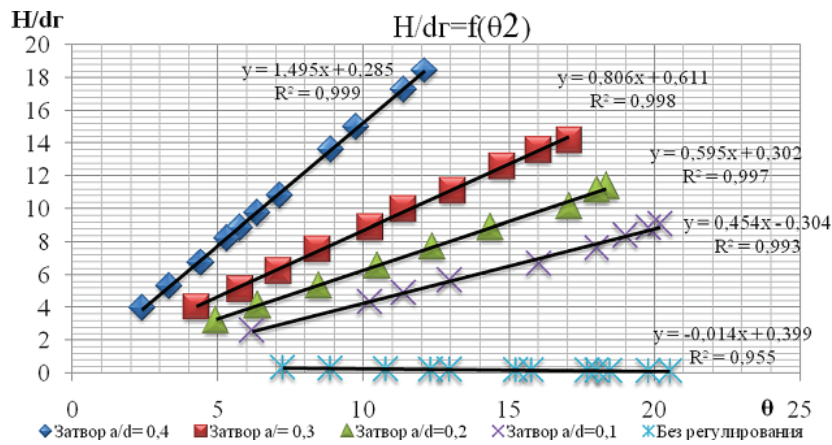


Рис. 6. График зависимости $\frac{H}{d_r} = f(\theta^2)$

Результаты имеют теоретическую значимость для гидравлических расчетов пропускной способности рассматриваемого водовыпуска.

Выводы

По экспериментальным данным получены графики пропускной способности в безразмерных координатах H/d_r и $\theta = \frac{Q}{w\sqrt{gd_r}}$.

Перерасчет безразмерного параметра расхода в абсолютную величину расхода может быть произведен по представленным в статье графикам и зависимостям для квадратного водовыпуска с поперечным размером в свету d , конструктивно сечение, которого можно обеспечить более простой и дешевой технологией бетонирования.

В результате можно сформулировать следующие рекомендации по применению и использованию таких местных сопротивлений, как затворы, размещаемые в концевой части водовыпуска: полученные эпюры векторных скоростей в сечениях при численном моделировании, которые позволяют выявить наиболее опасные участки водовыпуска, в которых нижняя и верхняя стенки подвергаются максимальному гидродинамическому воздействию напорного потока в результате появления на этих участках вихревых областей, которые могут создавать опасность появления поврежденных стенок за затворами и перед ними. Поэтому технологически размещенное в этой зоне стыковое соединение уменьшит общую

надежность водовыпуска, и в таком случае, если в этих местах невозможно избежать стыковых соединений, они должны быть выполнены с особенной тщательностью с затиркой бетонной поверхности или без нее, а также требуется обязательно технологически обеспечить доступ к участку для его эксплуатации, обслуживания и ремонта, если произойдет повреждение.

Библиографический список

1. Гидротехнические сооружения: уч. пособие для студ. гидротехн. спец. вузов. В 2-х ч. 2-е изд., перераб. и доп. Ч.1. Глухие плотины. – М.: Агропромиздат, 1985. – 318 с.
2. Алтунин В.И., Суэтина Т.А., Черных О.Н. Гидравлические расчёты водопропускных труб на автомобильных дорогах: уч. пособие. – М.: МАДИ, 2016. – 92 с.
3. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: учебник. – 5-е изд., стер. – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 656 с.: ил.
4. Михалев М.А. Гидравлический расчет напорных трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6. – С. 20-28.
5. Паливец М.С. К вопросу экспериментального определения гидравлического коэффициента трения в напорных водоводах квадратного сечения // Природообустройство. – 2016. – № 14. – С. 20-26.
6. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / И.Г. Грачев, В.М. Низовцев, С.Ю. Пирогов и др. – СПб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. – 1154 с.

7. Яньшин Б.И. Гидродинамические характеристики затворов и элементов трубопроводов. Конфузоры, диффузоры и затворы: учебник. – М.: Машиностроение, 1965. – 257 с.

8. Снежко В.Л., Палиивец М.С. Кинематическая структура потока и гидравлические сопротивления узла «регулируемая задвижка-тройник» в напорном водоводе // Природообустройство. – 2010. – № 2. – С. 54-59.

9. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Использование значений точности на практике. – Введ. 2002-04-23. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 43 с.

10. Шкуланов Е.И., Храповский В.А. Гидравлический расчет пропускной способ-

ности сооружений с горизонтальными трубами // Природообустройство. – 2008. – № 4. – С. 69-74.

11. Розанов Н.П. Гидравлические расчёты водопроводящих труб: уч. пособие. – М.: МГМИ, 1979.

Материал поступил в редакцию 03.07.2020 г.

Сведения об авторе

Палиивец Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии в АПК» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая, 44; e-mail: maxim6663@mail.ru

M.S. PALIIVETS

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after S.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

HYDRAULIC CALCULATION OF WATER DISCHARGE CAPACITY OF SQUARE WATER OUTLET DURING REGULATION

The article discusses hydraulic calculation of square water discharge capacity both during regulation and without regulation on the basis of experimental studies. According to the experimental data, a graph of the throughput capacity was built in dimensionless coordinates H/d_r and $\theta = \frac{Q}{\omega\sqrt{gd_r}}$, where H is the water head upstream above the threshold for entering the water outlet; Q and θ are flow rate and dimensionless flow rate parameter respectively; ω – the cross section area of the water outlet; g – acceleration of gravity. Recalculation of the dimensionless flow parameter into the absolute flow value for the hydraulic diameter of the water outlet d_r , $Q = f(\theta)$ can be performed according to the graphs and dependencies given in the article. The capacity of the structure at the pressure mode with non-flooded flow at the outlet was determined as a result of the construction of a graph of dependence $\frac{H}{d_r} = f(\theta^2)$ using N.P. Rozanov's method. In the article there are given schedules of dependences and formula of flow coefficient μ from a relative pressure before a water outlet of h_1 and behind it h_2 which allows to make a hydraulic calculation. Recommendations are made on the application and use of such local resistances as gates located in the end part of the water outlet during flow control.

Water outlet, hydraulic structure, culverts, head short pipeline, hydraulic area diameter, flow, capacity, flow coefficient.

References

1. Hydrotehnicheskie sooruzheniya. Ucheb. posobie dlya stud. gidrotechn. spets. vuzov. V 2-h. ch., pererab. i dop. Ch.I. Gluhie plotiny. – М.: Agropromizdat, 1985. – 318 s.

2. Altunin V.I., Suetina T.A., Chernykh O.N. Gidravlicheskie raschety vodopusknyh trub na avtomobilnyh dorogah: uch. Posobie. – М.: MADI, 2016. – 92 s.

3. Shterenlicht D.V. Gidravlika: ucheb. nik. – 5-e izd., ster. – SPb.: Izd-vo «Lan», 2015. – 656 s.: il. ISBN978-5-8114-1892-3.

4. Mikhalev M.A. Gidravlichesky raschet napornyh truboprovodov // Inzhenerno-stroitelny zhurnal. – 2012. – No. 6. – S. 20-28.

5. Paliivets M.S. K voprosu experimentalnogo opredeleniya gidravlicheskogo koefitsienta treniya v napornyh vodovodah kvadratnogo secheniya // Prirodoobustrojstvo. – 2016. – No. 14. – S. 20-26.

6. Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventilyatsionnyh system / I.G. Grachev, V.M. Nizovtsev, S.Yu. Pirogov i dr. – SPb.: ANO NPO «Mir i semya», 2001. – 1154 s.

7. **Yanshin B.I.** Gidrodinamicheskie ha-racteristici zatvorov i elementov truboprovodov. Confuzory, diffuzory i zatvory: ucheb-nik. – M.: Mashinostroenie, 1965. – 257 s.

8. **Snezhko V.L., Paliivets M.S.** Kine-maticheskaya structura potoka i gidravliches-kie soprotivleniya uzla «regulituemaya zad-vizhka-trojnik» v napornom vodovode // Pri-rodoobustrojstvo. – 2010. – No. 2. – S. 54-59.

9. GOST R ISO 5725-6-2002. Tochnost (pravilnost i pretsizionnost) metodov i resulta-tov izmerenij. Ispolzovanie znachenij tochnos-ti in praktike. – Vved. 2002-04-23. – M.: Izd-vo standartov, 2002. – 43 s.

10. **Shkulanov E.I., Khrapkovsky V.A.** Gidravlichesky raschet propusknoj sposobnos-ti sooruzhenij s gorizontalnymi trubami // Pri-rodoobustrojstvo. – 2008. – No. 4. – S. 69-74.

11. **RozaNov N.P.** Gidravlichesky rasche-ty vodoprovodyashchih trub: uch. posobie. – M.: MGMI, 1979.

The material was received at the editorial office
03.07.2020

Information about the author

Paliivets Maxim Sergeevich, candida-te of technical sciences, associate professor of the department «Information technologies in AIS», Federal state budgetary education-al institution of higher education «Russian State Agrarian University – Moscow Agri-cultural Academy named after C.A. Timiryazev », Moscow, Russian Federation: 127550, Moscow B. Academicheskaya St., 44; e-mail: maxim6663@mail.ru

УДК 502/504: 627.82:532.59

DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-78-85

В.Я. ЖАРНИЦКИЙ¹, Е.В. АНДРЕЕВ¹, С.В. КОВАЛЬ²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное автономное учреждение высшего образования

«Российский университет транспорта МИИТ» г. Москва, Российская Федерация

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУНТОВУЮ ПЛОТИНУ

В связи с возрастающим количеством бесхозных гидротехнических сооружений, находящихся в неудовлетворительном эксплуатационном состоянии на территории России и стран СНГ, ежегодно увеличивается вероятность угрозы техногенного характера на территориях, прилегающих к ГТС. В этой связи актуальными становятся задачи по совершенствованию и разработке мероприятий по предотвращению аварий и анализу деградационной активности существующих гидротехнических сооружений данного класса. В последние годы возросли угрозы террористического характера в отношении критически важных объектов водохозяйственного назначения. Ввиду отсутствия охранных мероприятий и предварительной оценки потенциального ущерба от разрушения гидротехнических сооружений они попадают в категорию объектов повышенной опасности. Основной задачей данных исследований является разработка метода расчётного обоснования устойчивости грунтовой плотины в условиях динамического воздействия. В результате исследования был произведён расчёт кинематических параметров и напряжённо-деформированного состояния фрагмента грунтовой плотины с использованием программного комплекса, разработанного для выполнения пространственных расчётов сложных систем «плотина-основание» с учётом реальной работы грунтов и конструкции плотины. Рассматриваются разные варианты нагружения фрагмента грунтовой плотины статическими и динамическими нагрузками.

Гидротехническое сооружение, разрушение гидротехнического сооружения, динамическое воздействие, протяжённые сооружения, оценка воздействия, прогнозирование воздействия, напорные элементы плотин, риск разрушения.

Введение. Анализ аварий и повреж-дений гидротехнических сооружений по-казывает, что механизм их возникновения

не поддаётся приемлемому уровню досто-верности. Одной из причин возникнове-ния таких аварий и катастроф могут быть