

УДК 502/504:532.51

А. А. ГАЙСИН, В. Л. СНЕЖКО

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

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФОРМЫ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ РАСХОДА

Работа посвящена увеличению диапазона регулирования напоров воды при помощи модернизации конструкции камеры слияния. Отмечается, что требованиям действующих строительных норм и правил предусматривают на компоновочных схемах мелиоративных систем устройства автоматического действия, управляющие процессами водоподачи и водораспределения. В статье приведена усовершенствованная конструкция гидродинамического регулятора расхода с установкой диафрагмы во входном сечении камеры слияния. Механические подвижные части существующих гидроавтоматов значительно снижают надежность работы сооружений вследствие коррозии и засорения. Исследование предложенной конструкции проводилось на основе сочетания физического и численного эксперимента. Численное моделирование производилось в STAR-CMM+. Модель основана на трехмерных нестационарных уравнениях Рейнольдса. Турбулентность моделировалась по стандартной $k-\varepsilon$ модели. Моделирование свободной поверхности течения производилась методом VOF (Volume of Fluid method) с гравитационной составляющей. По результатам экспериментов выявлено совпадение полученных данных с теоретическими значениями предельного относительного коэффициента расхода транзитного потока, соответствующим выравниванию горизонтов воды в камере слияния и нижнем бьефе. В результате исследований подтверждена эффективность установки диафрагмы с целью увеличения диапазона регулирования напоров в автоматических водовыпусках гидродинамического действия. Установлено, что диапазон регулирования напоров у предлагаемых гидродинамических водовыпусков в 1,8 раза выше, чем у существующих конструктивных решений. Описывается методика подбора высоты диафрагмы.

Гидравлические сопротивления, диффузор, регуляторы расхода.

The work relates to the increase of the range of water head regulation by means of modernization of the water streams merge camera. It is noted that the requirements of the existing building norms and rules provide devices of the automated action controlling the processes of water supply and distribution on the layout diagrams of reclamation systems. In the article there is given an improved design of the hydrodynamic flow regulator with installation of a diaphragm in the in-let cross-section of the merge camera. Mechanical movable parts of the existing hydroautomates significantly decrease the reliability of the operation of structures as a result of corrosion and pollution. Investigation of the proposed design was carried out on the basis of the physical and numerical experiment. Numerical simulation was performed in STAR-CMM+. The model is based on three-dimensional unsteady Reynolds equations. Turbulence was simulated according to the standard $k-\varepsilon$ model. Simulation of the free surface of flowing was made by a method VOF (Volume of Fluid method) with a gravitation component. According to the results of experiments there was found a coincidence of the received data with the theoretical values of the maximum relative coefficient of transit flow discharge corresponding to the leveling of water elevation in the merging camera and downstream. As a result of investigations there was confirmed the efficiency of diaphragm installation with the purpose of increasing the range of heads regulation in the automated water outlets of a hydrodynamic action. It is established that the range of heads regulation of the proposed hydrodynamic outlets is by 1,8 times higher in comparison with the existing design solutions. There is described a method of choice of the diaphragm height.

Hydraulic resistances, diffuser, flow regulators.

Перепад между бьефами водопропускных сооружений на оросительных каналах обычно не превышает 3 м, поперечное сечение труб водовыпуска может быть круглым или квадратным. По требованиям действующих строительных норм и правил компоновочные схемы мелиоративных систем должны предусматривать устройства автоматического действия, управляющие процессами водоподачи и водораспределения [1].

Механические подвижные части существующих гидроавтоматов значительно снижают надежность работы сооружений из-за коррозии и засорения. Использование гидравлических сопротивлений двух сливающихся напорных потоков позволило разработать для каналов оросительной сети новые технические устройства автоматизации – гидродинамические регуляторы расхода воды, которые могут быть получены изменением концевой участка типовых трубчатых водовыпусков [2]. Экспериментальные исследования показали, что основной

недостаток этих сооружений – ограничение по напорам, в пределах которого возможна автоматическая подача расхода в зависимости от водопотребления в нижнем бьефе. В предельного значения регулирующего напора принимается отношение уровней воды в нижнем бьефе при минимальном и максимальном водопотреблении ниже створа перегородивающего сооружения.

Целью исследований стало совершенствование конструкции камеры слияния регулятора для увеличения диапазона регулирования напора при сохранении конструктивной простоты сооружения и технологичности его исполнения.

Регулятор усовершенствованной конструкции имеет жесткую диафрагму во входном сечении камеры слияния (рис. 1). Для предотвращения снижения пропускной способности водовыпуска, вызванного внесением дополнительного сопротивления, концевой участок оборудован диффузором, параметры которого подбирались из условия сохранения первоначального коэффициента расхода сооружения.

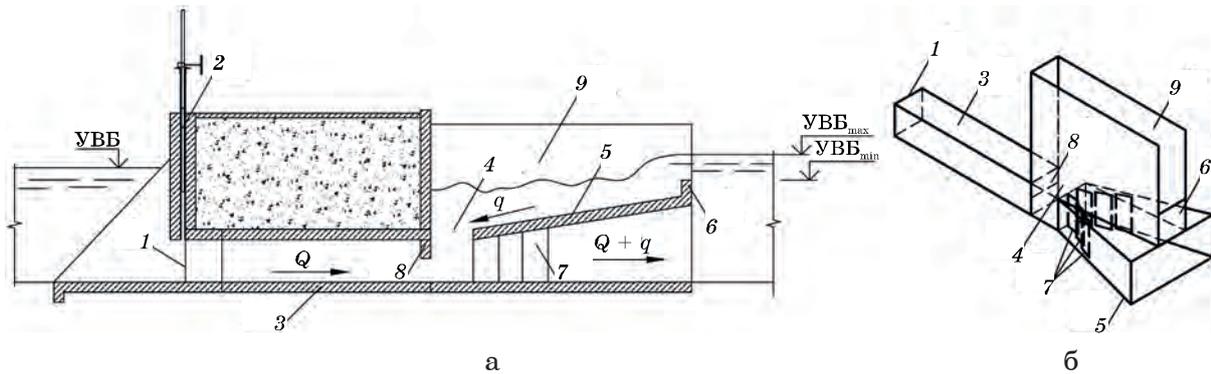


Рис. 1. Усовершенствованная конструкция гидродинамического регулятора расхода: а – расчетная схема; б – схема гидравлической модели; 1 – входной оголовок регулятора; 2 – головной затвор; 3 – водопроводящая труба; 4 – камера слияния; 5 – прямоугольный диффузор; 6 – водосливная кромка подачи управляющего расхода q ; 7 – направляющие лопатки; 8 – диафрагма; 9 – пространство над диффузором

Увеличение пропускной способности трубчатых сооружений устройством расширяющегося выходного участка было описано в [3]. Основным условием назначения высоты диафрагмы предлагается соблюдение равенства расхода трубчатого водовыпуска Q_r и расхода модернизированного регулятора Q_ϕ :

$$Q_r / Q_\phi = K_Q = 1, \quad (1)$$

где K_Q – коэффициент изменения расхода.

Уравнение Бернулли, составленное

для сжатого сечения (входного сечения камеры слияния) и выходного сечения диффузора имеет вид:

$$h_1 + \alpha_c \frac{Q_r^2}{2g\omega_c} = h_2 + \alpha_2 \frac{Q_r^2}{2g\omega_2} + \zeta_{д.с.} \frac{Q_r^2}{2g\omega_c}, \quad (2)$$

где α_c и α_2 – коэффициенты Кориолиса соответственно в сжатом и выходном сечениях диффузора; ω_c и ω_2 – площади соответственно сжатого и выходного сечений диффузора; $\zeta_{д.с.}$ – коэффициент сопротивления диффузора в сети; h_1 и h_2 – пьезометрическая высота соответственно во входном (сжатом) и выходном сечениях диффузора.

С учетом зависимости (1) после преобразований (2) получена зависимость для определения коэффициента сопротивления диффузора:

$$\zeta_{д.с.} = \frac{\varepsilon^2}{\mu_T^2} (\mu_T^2 + K_Q^2 - 1),$$

где μ_T – коэффициент расхода водопроводящей трубы; ε – коэффициент сжатия:

$$\varepsilon = \omega_c / \omega_T,$$

где ω_T – площадь транзитной трубы водовыпуска.

При коэффициенте изменения расхода $K_Q = 1$ зависимость для коэффициента сопротивления диффузора имеет следующий вид:

$$\zeta_{д.с.} = \varepsilon^2.$$

В этом случае высота диафрагмы может быть определена из уравнения:

$$h_{\text{диаф.}} = h_T - \sqrt{\zeta_{д.с.}} \cdot h_T,$$

где h_T – высота сечения водопроводящей трубы; $\zeta_{д.с.}$ – коэффициент сопротивления диффузора при выходе потока в объем бьефа.

Для расчетов необходимо знать значение коэффициента сопротивления диффузора, которым будет дооборудован выходной участок водовыпуска. В предлагаемой конструкции концевой участок имел прямоугольный диффузор со степенью расширения $n_1 = 4$, углами горизонтального и вертикального расширения $\gamma = 30^\circ$ и $\alpha = 5^\circ$. Для предотвращения сбойности течения авторами была разработана схема установки направляющих лопаток (дефлекторов). Экспериментально определено значение коэффициента сопротивления при выходе потока в объем нижнего бьефа $\zeta_{д.с.} = 0,28$ [4].

При максимальном водопотреблении ниже створа перегораживающего сооружения водовыпуск-регулятор работает без слияния потоков. Сигналом управления, запускающим процесс регулирования, служит непосредственный рост уровня воды в отводящем канале от отметки УНБ_{мин} до УНБ_{макс}. Роль устройства управления берет на себя расход q , поступающий со стороны нижнего бьефа переливом через водослив на крышке диффузора и снижающий поступление транзитного расхода Q_T , проходящего через напорный водо-

выпуск [5]. Диапазон регулирования по напорам ограничен выравниванием горизонта воды в нижнем бьефе и камере слияния. Его величина определяется высотой слоя перелива через водослив $H_{\text{рег.}}$, обращенный в сторону нижнего бьефа:

$$H_{\text{рег.}} = \mu_0 \omega_1 \sqrt{\frac{H_0}{\omega_k B_k}} \cdot (1 - \mu'_{\text{пр}}),$$

где ω_1 – площадь сечения трубы перед диффузором, $\omega_1 = \omega/n_1$; H_0 – перепад между бьефами при максимальном водопотреблении; ω_k – площадь живого сечения канала; B_k – ширина канала по урезу воды; $\mu'_{\text{пр}}$ – относительный коэффициент расхода при минимальном транзитном расходе, $\mu'_{\text{пр}} = \mu_{\text{мин}}/\mu_{\text{макс}}$; μ_0 – коэффициент расхода без регулирования ($q = 0$).

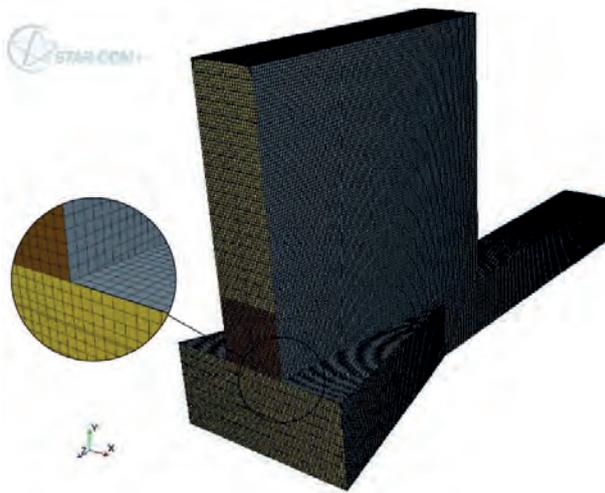
Одним из основных критериев увеличения диапазона регулирования по напорам является уменьшение относительного коэффициента транзитного расхода, теоретическое значение которого определяется по формуле:

$$\mu' = \frac{\mu_{\text{т.с.}}}{\mu_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\zeta_{\text{п.с.}} \cdot (1+m)^2 + m[(2+m)\zeta_{д.с.} + (1+m) \cdot \Delta\alpha]}{\zeta_{\text{т.с.}} + \zeta_{д.с.}}}}, \quad (2)$$

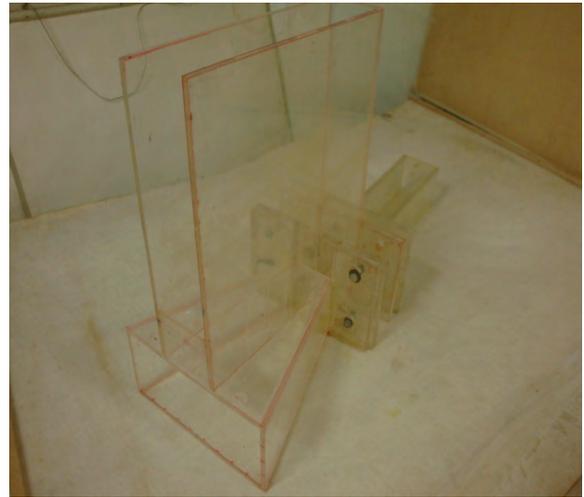
где $\Delta\alpha$ – разница между коэффициентами Кориолиса двух потоков; $\zeta_{\text{т.с.}}$ – коэффициент сопротивления транзитного водовода до камеры слияния (как правило равен коэффициенту сопротивления при входе $\zeta_{\text{вх.}}$); m – отношение управляющего расхода к транзитному; $\zeta_{\text{п.с.}}$ – потери на проход в камере слияния.

Для определения пропускной способности гидродинамического регулятора расхода усовершенствованной конструкции был проведен гибридный эксперимент, сочетающий в себе физический эксперимент и численное моделирование в пакете STAR-CMM+ (рис. 2).

Физический эксперимент проводился в зеркальном гидравлическом лотке лаборатории кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики Института природообустройства имени А. Н. Костякова ФГБОУ ВПО «РГАУ–МСХА имени К. А. Тимирязева». Рабочей жидкостью – вода. Диапазон чисел Рейнольдса в эксперименте составлял $Re = (1,1 \dots 1,3) \cdot 10^5$. Статистическая обработка



а



б

Рис. 2. Экспериментальная модель гидродинамического регулятора расхода: а – модель для численного эксперимента (расчетная сетка); б – гидравлическая модель из органического стекла

результатов измерений производилась согласно требованиям ГОСТ Р ИСО 5725-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений». Предельная относительная суммарная ошибка (систематическая и случайная) с вероятностью 0,95 не превышала для расходов 1,2 %, для давлений – 1,1 %, для скоростей – 4,2 %, для коэффициентов местного сопротивления – 3,0 %. Масштаб моделирования 1:10.

Численное моделирование турбулентного течения базировалось на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Замыкание системы производилось с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Выбор именно $k-\varepsilon$ модели был основан на рекомендациях, полученных при проведении гибридного эксперимента для гидродинамических стабилизаторов расхода в работе [5]. Моделирование свободной поверхности течения производилась методом VOF (Volume of Fluid method) с гравитационной составляющей. Двухфазная среда рассматривалась как однофазная текучая среда, свойства которой изменялись согласно объемной доле каждой из присутствующих фаз. В качестве граничных условий принято гидростатическое давление во входном и выходном сечениях регулятора, нулевые значения скоростей на внутренних стенках модели и

эквивалентная шероховатость поверхностей. Результатом сходимости задачи стал установившийся уровень воды в лотке, моделирующем отводящий канал, при неизменяющихся скоростях по длине сооружения.

Для выбора оптимальных параметров расчетной сетки в численном эксперименте выполнены экспериментальные исследования сеточной сходимости. При базовом размере ячейки 2,5 мм получено незначительное изменение решения (рис. 2а).

Сопоставление результатов гибридного эксперимента и теоретических значений (2) приведено на рис. 3. Разброс экспериментальных точек вокруг теоретической кривой не превышает пределов погрешности эксперимента (5%).

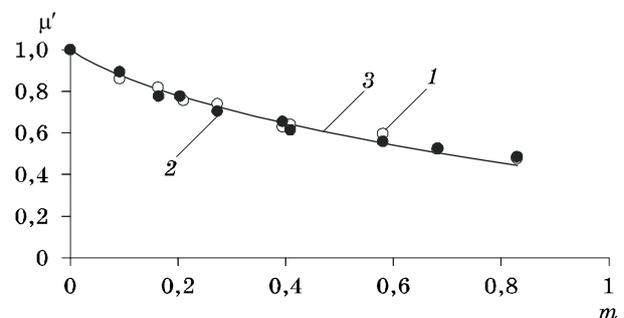


Рис. 3. Относительный коэффициент расхода транзитного потока регулятора: 1 – эксперимент; 2 – эксперимент в STAR-CMM+; 3 – теоретические данные

При выравнивании горизонта воды в камере слияния и нижнем бьефе предельное значение относительного коэффициента расхода транзитного потока равно $\mu'_{\text{пред}} = 0,47$, которое соответствует отношению управляющего и транзитного расходов $m = 0,83$. Регулятор усовершенствованной конструкции позволяет снизить пропускную способность водовыпуска на 53 %. Разработанные ранее конструкции с прямыми углами подачи управляющего потока $\beta = 90^\circ$ прекращали процесс регулирования при $m = 0,25$ и имели предельный коэффициент расхода равный $\mu'_{\text{пред}} = 0,70$, то есть снижали пропускную способность водовыпуска на 30 % [6]. При прочих равных условиях у предлагаемых авторами конструкций диапазон регулирования по напорам будет выше в 1,8 раз, чем у существующих решений.

Для верификации предложенной методики подбора высоты диафрагмы экспериментально были определены значения коэффициентов расхода, приведенного к площади сжатого сечения трубчатого водовыпуска и регулятора без подачи управляющего потока ($\mu_t = \mu_0 = 0,77$), подтвердившие справедливость рекомендаций.

Выводы

Установка диафрагмы во входном сечении камеры слияния регулятора эффективно увеличивает диапазон регулирования по напорам.

Разработанная методика расчета высоты диафрагмы проверена экспериментальными данными.

Диапазон регулирования по напорам у предлагаемых гидродинамических водовыпусков в 1,8 раза выше, чем у существующих конструктивных решений.

1. Мелиоративные системы и сооружения: СТО НОСТРОЙ 2.33.20.2011: Ч. 1. Оросительные системы. – М.: Изд-во

БСТ, 2012. – 139 с.

2. Снежко В. Л. К вопросу автоматизации напорных водовыпускных сооружений малых гидроузлов // Перспективы науки. – 2010. – № 12. – С. 54–58.

3. Снежко В. Л., Бенин Д. М. Конструктивные особенности гидродинамических стабилизаторов расхода // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2010. – № 9 (51). – С. 127–128.

4. Гайсин А. А., Снежко В. Л. Методы предотвращения сбойных течений в коротких диффузорах с большим углом расширения // Научное обозрение. – 2014. – № 8. – С. 89–93.

5. Снежко В. Л., Бенин Д. М. Численное и физическое моделирование при изучении напорных водопропускных сооружений в гидротехнике // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – № 2 (20). – С. 31–37.

6. Хусни С. И. Совершенствование конструкций регулирующих сооружений на оросительных каналах с применением гидродинамического саморегулирования: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993. – 199 с.

7. Гайсин А. А. Наладочные опыты для проведения совместного физического и численного эксперимента // Экология и строительство. – 2015. – № 1. – С. 4–7.

Материал поступил в редакцию 05.03.15.

Гайсин Айнурт Альбертович, аспирант

Тел. +7-915-111-07-61

E-mail: Ainurt.g@yandex.ru

Снежко Вера Леонидовна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой информационных технологий в строительстве

E-mail: VL_Snejko@mail.ru