

05.23.16 Гидравлика и инженерная гидрология

Оригинальная статья

УДК 502/504: 532.5:532.533:627.844

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-91-97

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА РЕГУЛИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ИНЖЕКЦИОННЫХ ВОДОВЫПУСКОВ

СНЕЖКО ВЕРА ЛЕОНИДОВНА [✉], д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой
vl_snejko@mail.ru

БЕНИН ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук, доцент
dbenin@rgau-msha.ru

КОБОЗЕВ ДАНИИЛ ДМИТРИЕВИЧ, ассистент
kobozev.daniil@yandex.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49. Россия

Высокая степень износа гидротехнических сооружений мелиоративных систем и снижение эффективности использования мелиорируемых земель потребовала принятия на государственном уровне ряда программ, ставящих целью развитие и модернизацию мелиоративного комплекса России. Обеспечение водного режима на орошаемых землях требует внедрения технологических инноваций, способных обеспечить регулирование водоподачи гидротехнических сооружений без привлечения невозобновляемых источников энергии при максимальной экономии водных ресурсов. Рассматриваемые в работе инжекционные регуляторы расхода способны использовать гидравлическую энергию потока и осуществлять процесс регулирования с обратной связью. При снижении водопотребления в нижнем бьефе регулятор изменяет свою пропускную способность, обеспечивая в концевой части сооружения циркуляцию излишков поступающей воды. В основу работы водовыпусков положен процесс инжекции, при котором регулятор является подобием струйного насоса, расположенного под перегораживающим каналом сооружения или под плотиной небольшого пруда. Энергия потока, проходящего по трубе со стороны верхнего бьефа, используется для инжекции излишков воды, поступающих с током обратной волны по отводящему каналу. Приводятся результаты теоретических исследований, физического и численного моделирования инжекционных водовыпусков с различной формой исполнения проточной части. Особое внимание уделено исполнению выходного участка сооружения – диффузору и призматическому участку перед ним – камере смешения. Исследованы и впервые получены значения коэффициентов гидравлического сопротивления пирамидальных диффузоров с высокой степенью расширения. Для предотвращения сбойности течения диффузоры оборудованы укороченными раздельными стенками. Обработка данных эксперимента выполнена согласно международным стандартам. При численном моделировании течения в регуляторе в качестве начальных и граничных условий использованы данные физического эксперимента. Приведено сравнение коэффициента расхода исследованных регуляторов, определены значения параметров, необходимых для выполнения гидравлического расчета.

Ключевые слова: ирригация, гидротехнические сооружения, водовыпуски, регуляторы расхода, инжекция, гидравлические сопротивления

Формат цитирования: Снежко В.Л., Бенин Д.М., Кобозев Д.Д. Влияние конструктивных особенностей на регулируемую способность инжекционных водовыпусков // Природообустройство. – 2021. – № 5. – С. 91-97. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-91-97.

© Снежко В.Л., Бенин Д.М., Кобозев Д.Д., 2021

Original article

INFLUENCE OF DESIGN FEATURES ON THE REGULATING CAPACITY OF INJECTION WATER OUTLETS

SNEZHKO VERA LEONIDOVNA , doctor of technical sciences, professor, head of the department
vl_snejko@mail.ru

BENIN DMITRY MIKHAILOVICH, candidate of technical sciences, associate professor
dbenin@rgau-msha.ru

KOBOZEV DANIIL DMITRIEVICH, assistant
kobozev.daniil@yandex.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49. Russia

The high degree of deterioration of hydraulic structures of reclamation systems and a decrease in the efficiency of using reclaimed land required the adoption at the state level of a number of programs aimed at the development and modernization of the reclamation complex of Russia. Ensuring the water regime on irrigated lands requires the introduction of technological innovations that can ensure the regulation of the water supply of hydraulic structures without involving non-renewable energy sources with maximum savings in water resources. The injection flow controllers considered in the work are able to use the hydraulic energy of the flow and carry out the control process with feedback. With a decrease in water consumption downstream, the regulator changes its capacity, providing the circulation of excess incoming water at the end of the structure. The operation of water outlets is based on the injection process, in which the regulator is a kind of jet pump located under the structure blocking the channel or under the dam of a small pond. The energy of the flow passing through the pipe from the upper stream is used to inject excess water coming from the reverse wave current through the diverting channel. The results of theoretical studies, physical and numerical modeling of injection water outlets with various forms of execution of the flow part are presented. Particular attention is paid to the execution of the output section of the structure – the diffuser and the prismatic section in front of it – the mixing chamber. The values of the hydraulic resistance coefficients of pyramidal diffusers with a high degree of expansion were studied and obtained for the first time. To prevent flow failure, the diffusers are equipped with shortened separate walls. The processing of the experiment data is carried out in accordance with international standards. When numerically modeling the flow in the regulator, the data of the physical experiment are used as the initial and boundary conditions. There is given a comparison of the flow rate of the studied regulators, the values of the parameters necessary for performing the hydraulic calculation are determined.

Keywords: irrigation, hydraulic structures, water outlets, flow regulators, injection, hydraulic resistances

Format of citation: Snezhko V.L., Benin D.M., Kobozev D.D. Influence of design features on the regulating capacity of injection water outlets // *Prirodobustrojstvo*. – 2021. – № 5. – S. 91-97. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-5-91-97.

Введение. Экономический кризис в России 90-х годов и смена собственников отразились на состоянии мелиоративных систем и эффективности их работы. В настоящее время в России фактически орошается 3820,561 тысяча гектар, что составляет 82% от общей площади орошаемых земель. Значительная часть основных фондов изношена либо морально устарела [1]. Недостаточный уровень оснащения оросительных систем современной техникой приводит к неоправданным потерям воды, подаваемой на орошение, и негативно сказываются на мелиоративном состоянии земель.

Экономия воды и предотвращение непродуцируемых сбросов из оросительных каналов

и водохранилищ мелиоративного назначения может быть обеспечена внедрением средств автоматизации гидротехнических сооружений. В апреле 2021 года Правительством Российской Федерации принята «Государственная программа эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения и развития мелиоративного комплекса». Одна из целей программы – обеспечение к концу 2031 года водного режима гидромелиоративных систем на площади 1353,5 тысяча гектаров. В программе предусмотрено осуществление прикладных научных исследований и крупных инвестиционных проектов. Актуальной технологической инновацией является разработка водопропускных

сооружений, способных обеспечить автоматическое регулирование водоподдачи без привлечения невозобновляемых источников энергии.

В мировой практике широко используются электромеханические регуляторы расхода в виде затворов, приводимых в действие вручную или дистанционно [2]. Автоматизация подачи воды, основанная на использовании датчиков уровня, и связанного с их показаниями открытия затвора, применяется на самотечных системах орошения риса в Италии [3]. Применение электромеханических затворов связано с дополнительными затратами энергии, что может сказываться на себестоимости сельскохозяйственной продукции и зачастую сдерживает внедрение средств автоматизации в малых хозяйствах не только в России, но и за рубежом [4]. Альтернативой автоматическим затворам электромеханического действия выступает использование затворов гидравлического действия [5, 6]. Гидравлическая энергия потока и особенности его движения в пределах проточного тракта водопропускных сооружений положены в основу работы новых инъекционных регуляторов расхода [7]. Регуляторы этого типа предназначены для установки на перепадах каналов или на выходе из водохранилища в канал (рис. 1).

Когда дождевальные машины забирают воду из оросительного канала ниже створа регулятора, пропускная способность водовыпуска максимальна и отметка воды в нем соответствует УНБ_{max}. После остановки дождевальных машин водозабор из канала снижается, и уровень воды повышается до отметки УНБ_{min}. Излишки водоподдачи (расход ΔQ) аккумулируются в слое воды $H_{пер}$ и определяются по зависимости:

$$\Delta Q = B \cdot h_v \cdot C \quad (1)$$

где B – ширина канала по урезу воды; h_v – высота волны в створе; C – скорость распространения обратной волны, $C \approx \sqrt{\frac{g \cdot \omega}{B}}$, здесь g – ускорение свободного падения; ω – площадь живого сечения канала.

Камерой смешения является горизонтальный участок водовыпуска, расположенный между сечениями по крайнему правому срезу отверстия 3 (рис. 1) и входному сечению диффузора. Промежуточный бьеф над крышкой диффузора

формируется при переливе из нижнего бьефа излишков воды ΔQ , которые поступают через водосливной порог 2, расположенный на отметке УНБ_{max}. Через отверстие 3 вода из промежуточного бьефа подсасывается (инжектируется) в камеру смешения и, пройдя через диффузор, вновь поступает в объем нижнего бьефа. Для осуществления процесса регулирования следует стремиться к соблюдению условия $\Delta Q \approx Q_0$, где Q_0 – расход инжектируемого потока. Рабочим или инжектирующим потоком является поток с расходом Q_1 , поступающий по напорной трубе из верхнего бьефа в нижний бьеф регулятора.

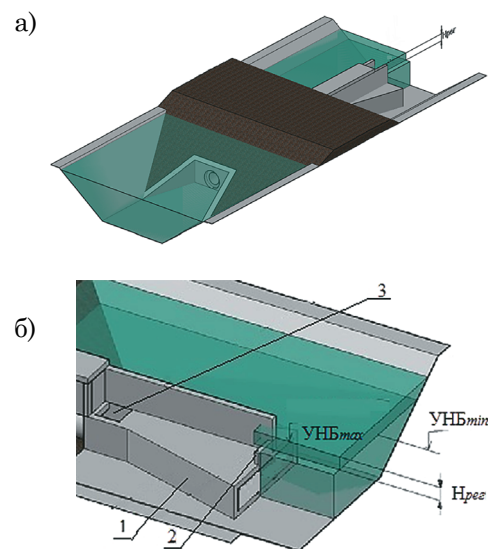


Рис 1. Пример размещения инъекционного регулятора:

а – вид со стороны верхнего бьефа;

б – вид со стороны нижнего бьефа (фрагмент):

1 – диффузор; 2 – водосливной порог;

3 – отверстие в верхней стенке трубопровода

Fig. 1. An example of the placement of the injection regulator:

a – view from the side of the upstream;

b – view from the side of the downstream (fragment):

1 – diffuser; 2 – spillway threshold;

3 – hole in the upper wall of the pipeline

Материал и методы исследований.

Существующие теоретические зависимости для гидравлического расчета сооружения получены при рассмотрении схемы течения в регуляторе как процесса инъекции [7]. Расход инжектирующего потока Q_1 определяется по зависимости:

$$Q_1 = F_1 \left(\frac{2 \cdot g \cdot H_1 \cdot B^2 - 2 \cdot A \cdot C + \sqrt{(2 \cdot A \cdot C - 2 \cdot g \cdot H_1 \cdot B^2)^2 + 4 \cdot C^2 \cdot (B^2 - A^2)}}{2 \cdot (B^2 - A^2)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

где H_1 – разность уровней воды в верхнем и промежуточном бьефе; A, B, C – константы, значения которых зависят площади, занимаемой потоками во входном сечении камеры смешения, коэффициента сопротивления диффузора ζ и разности уровней воды в нижнем бьефе и промежуточном бьефе H_2 .

Коэффициент сопротивления диффузора ζ с учетом выброса части энергии в объем нижнего бьефа определяется по формуле:

$$\zeta = \zeta_c + \alpha \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

где ζ_c – коэффициент сопротивления диффузора при работе в сети; v_2 – скорость в выходном сечении диффузора; α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей в выходном сечении диффузора.

Расход инжектируемого потока, циркулирующий между нижним бьефом и камерой смешения, может быть вычислен как:

$$Q_2 = F_2 \frac{F_1 \cdot g_1 + F_0 \cdot (g_1^2 - 2gH_1)^{1/2}}{F_2} \quad (4)$$

где F_2 – площадь камеры смешения; F_0 – площадь, занимаемая инжектируемым потоком в камере смешения; F_1 – площадь, занимаемая инжектирующим потоком в камере смешения (площадь сопла). v_1 – скорость инжектирующего потока на выходе из сопла, $v_1 = Q_1 / F_1$.

Целью исследований стало сравнение гидравлических характеристик инжекционных регуляторов при изменении конструктивных параметров выходного участка. Проведены физический и численный эксперименты с двумя вариантами модели регулятора.

Зеркальный гидравлический лоток достаточной длины (более 8 метров) был разделен на бьефы, между которыми располагались модели, выполненные из органического стекла в масштабе 1:10. Подобие потоков обеспечивалось равенством коэффициента трения λ модели и природы. Гидравлическая эквивалентная шероховатость стенок моделей равна $\Delta = 0.03$ мм. Турбулентный режим течения с числами Рейнольдса $Re > 1,2 \cdot 10^5$ обеспечивал исследования в автомоделной области. Точность измерений в экспериментах определялась по значению предельной относительной суммарной ошибки – систематической и не исключенной случайной [8]. С доверительной вероятностью 95% предельная суммарная ошибка при измерении глубин потока равна $\pm 2.4\%$, расходов $\pm 2.3\%$, пьезометрического давления $\pm 1.5\%$, при определении коэффициента сопротивления диффузора $\pm 2.7\%$. Вид первой модели приведен на рисунке 2.

Поступление инжектирующего потока происходило по трубе водовыпуска 1. Через водослив 6 на крышке диффузора 5 из нижнего бьефа переливался инжектируемый поток. Площадь отверстия 3 в верхней стенке трубы равна диаметру трубы d . Длина камеры смешения 4 равна $3d$. Использован короткий диффузор со степенью расширения $n = 3$, углом

горизонтального расширения $\gamma = 20^\circ$, углом вертикального расширения $\theta = 5^\circ$. Для предотвращения сбойности течения в диффузоре установлены две укороченные разделительные стенки длиной $2d$, вынесенные против течения на расстояние $0,3d$. Торцы разделительных стенок обточены под углом 45° . Вторая модель отличалась длиной камеры смешения и конструкцией диффузора. Длина камеры смешения составляла $1,5d$, диффузор имел степень расширения $n = 4$, угол горизонтального расширения $\gamma = 30^\circ$ и вертикального расширения $\theta = 5^\circ$. Разделительные стенки имели ту же длину и угол обточки, но передние торцы стенок располагались вровень со входным сечением диффузора.

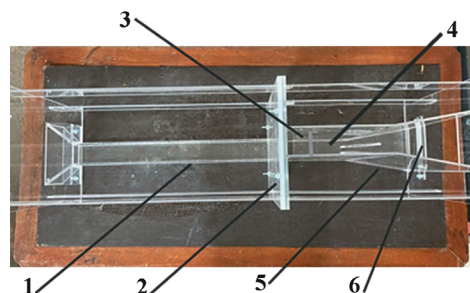


Рис. 2. Модель регулятора (вид сверху):

- 1 – труба водовыпуска;
- 2 – перегородка между бьефами;
- 3 – отверстие; 4 – камера смешения;
- 5 – диффузор с разделительными стенками;
- 6 – водосливной порог

Fig. 2. Regulator model (top view):

- 1 – outlet pipe; 2 – partition between the upstream and downstream;
- 3 – hole; 4 – mixing chamber;
- 5 – diffuser with dividing walls;
- 6 – spillway threshold

Результаты и обсуждение. Впервые экспериментально определены коэффициенты сопротивления диффузоров в каждой модели регуляторов. Для первой конструкции коэффициент сопротивления диффузора при выходе потока в объем нижнего бьефа равен $\zeta = 0,26$. Экспериментальное значение коэффициента сопротивления диффузора при работе в сети $\zeta_c = 0,15$ вполне согласуется с данными, приводимыми в справочной литературе [9]. Для второй конструкции при выходе потока в объем нижнего бьефа $\zeta = 0,3$ (для сравнения: коэффициент сопротивления аналогичных диффузоров с дефлекторами $\zeta = 0,28$, с разделительными стенками полной длины $\zeta = 0,35$).

Численное моделирование течения в регуляторе выполнено в пакете STAR-CCM+. Расчетная сетка имела более густые ячейки

в области разделительных стенок. Использована $k-\varepsilon$ модель турбулентности со стандартным набором констант [10]. Эти модели турбулентности хорошо зарекомендовали себя

при численном моделировании струйных аппаратов [11]. Пример векторного поля скоростей, полученный для второй модели регулятора, приведен на рисунке 3.

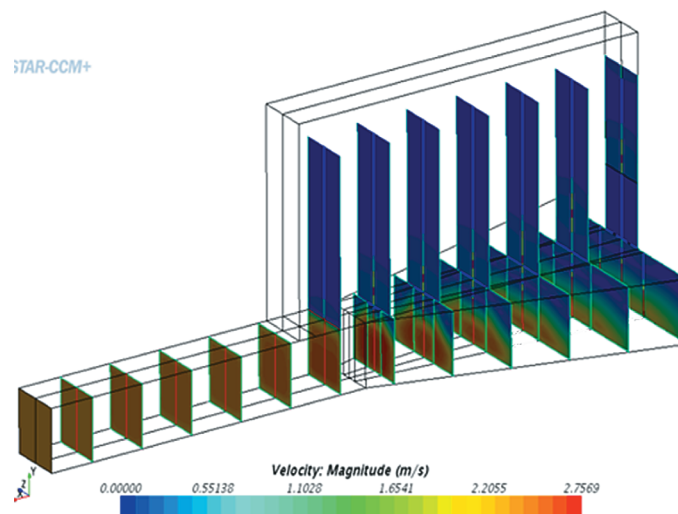


Рис. 3. Пример векторного поля скоростей

Fig. 3. Example of a velocity vector field

Рассмотрение начального участка камеры смешения как сопла с условно постоянным коэффициентом сжатия, равным отношению площади сечения, занимаемой инжектирующим расходом, к общей площади камеры смешения, позволило после применения гибридного моделирования определить значение $F_1/F_2 = 0,8$ для первой конструкции регулятора и $F_1/F_2 = 0,86$ для второй.

Коэффициент расхода регулятора μ_{vod} при максимальном водопотреблении (без инжекции) – постоянная величина, связанная с особенностями исполнения проточной части сооружения. Экспериментальные значения μ_{vod} , приведенные к площади F_1 сечения камеры смешения, равны 0,99 для первой конструкции и 0,95 для второй. Это хорошо согласуется с теоретическим определением коэффициентов расхода по известным в гидравлике зависимостям. Изменение в процессе инжекции относительного коэффициента расхода μ/μ_{vod} приведено на рисунке 4 для обоих сооружений.

Внесение камеры смешения достаточной длины увеличивает в несколько раз диапазон работы регуляторов по напорам и способствует значительному росту коэффициента расхода сооружения при регулировании (в 2 раза). Это обеспечивает инжекцию из нижнего бьефа большего объема воды. В данном случае диффузор регулятора имеет меньшую степень

расширения, короче и конструктивно проще. Полученные зависимости не противоречат основным положениям теории инжекции. Длина камеры смешения – важная характеристика струйных устройств. Из теории инжекционных насосов известно, что оптимальная длина камеры смешения лежит в пределах 2...4 диаметра сопла [10, 13]. Первая из конструкций имела оптимальную длину камеры, в то время как вторая модель этим условиям не удовлетворяла.

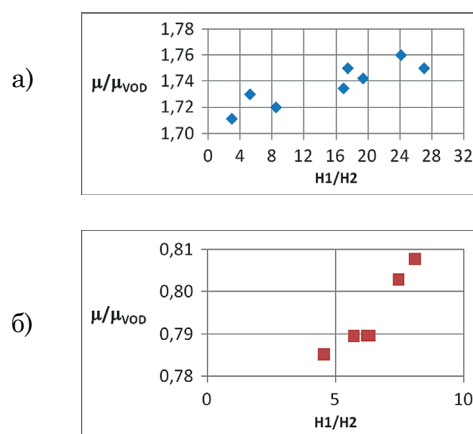


Рис. 4. Отношение коэффициента расхода при инжекции к коэффициенту расхода без регулирования:

а) первая модель; б) вторая модель

Fig. 4. The ratio of the flow coefficient during injection to the flow coefficient without regulation:

a) the first model; b) the second model

Выводы

Впервые экспериментально определены коэффициенты сопротивления диффузоров с укороченными разделительными стенками при выходе потока в объем нижнего бьефа. В результате гибридного эксперимента выяснено, что инжектирующий поток способен вызвать подъем воды из промежуточного бьефа до уровня нижнего бьефа при всех

горизонтах воды, не превышающих отметки поверхности воды в отводящем канале. Для двух конструкций определены условно постоянные параметры сопла, что позволяет выполнять гидравлический расчет регуляторов. Оптимизация долины камеры смешения значительно увеличивает относительный коэффициент расхода и инжектирующую способность регулятора.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2020-905 от 16.11.2020 г. о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

Gratitude. The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation within the framework of the agreement No. 075-15-2020-905 of 16.11.2020 on the provision of a grant in the form of subsidies from the federal budget for state support for the creation and development of the world-class scientific center «Agrotechnologies of the Future».

Библиографический список

1. Мелиоративный комплекс Российской Федерации: информ. издание. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 304 с.
2. Amaral, Do L.G. H., Ramos M.M., Da Silva D.D., Cecon P.R., & Da Freitas L.C.S.R. (2010). Performance of an automatic discharge regulator for irrigation channels. *Engenharia Agricola*, 30(6), 1165-1177. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600017>
3. Smith R.J., Raine S.R., & Minkovich J. (2005) Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton *Agricultural Water Management*, 71, pp. 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.07.008>
4. Menon J., & Mudgal B.V. (2018). Experimental determination of contraction coefficient and velocity coefficient for radial gates with elliptical lips. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 43 (4). <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0818-x>
5. Masseroni D., Moller P., Tyrell R., Romani M., Lasagna A., Sali G., ... Gandolfi C. (2018). Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. *Agricultural Water Management*, 201, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.019>
6. The shutter-automatic machine throughput of the washing device of the water level automatic regulator Mukaddas-Gaukhar Kadirova E3S Web Conf. 26403065 (2021) DOI: 10.1051/e3sconf/202126403065
7. Бенин Д.М., Снежко В.Л., Абдуллаев И.И. Гидравлические характеристики инжекционных регуляторов расхода //

References

1. Meliorativnyj kompleks Rossijskoj Federatsii: inform. izdanie. – М.: FGBNU «Rosinformagroteh», 2020. – 304 s.
2. Amaral, Do L.G. H., Ramos M.M., Da Silva D.D., Cecon P.R., & Da Freitas L.C.S.R. (2010). Performance of an automatic discharge regulator for irrigation channels. *Engenharia Agricola*, 30(6), 1165-1177. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600017>
3. Smith R.J., Raine S.R., & Minkovich J. (2005) Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton *Agricultural Water Management*, 71, pp. 117-130. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.07.008>
4. Menon J., & Mudgal B.V. (2018). Experimental determination of contraction coefficient and velocity coefficient for radial gates with elliptical lips. *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 43 (4). <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0818-x>
5. Masseroni D., Moller P., Tyrell R., Romani M., Lasagna A., Sali G., ... Gandolfi C. (2018). Evaluating performances of the first automatic system for paddy irrigation in Europe. *Agricultural Water Management*, 201, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.019>
6. The shutter-automatic machine throughput of the washing device of the water level automatic regulator Mukaddas-Gaukhar Kadirova E3S Web Conf. 26403065 (2021) DOI: 10.1051/e3sconf/202126403065
7. Benin D.M., Snezhko V.L., Abdullaev I.I. Gidravlicheskie harakteristiki inzhektionsnyh regulyatorov rashoda //

Природообустройство. – 2020. – № 3. – С. 86-91.
DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-86-91

8. **Снежко В.Л.** Современные способы обработки данных в исследованиях гидравлических сопротивлений турбулентных потоков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 179-185.

9. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

10. **Wilcox D.C.** Turbulence Modeling for CFD [Text]: 3rd ed. / D.C. Wilcox. – California: DCW Industries, 2006. – 515 p.

11. **Sugati D., & Effendy M.** (2018). RANS study of the liquid jet gas ejector. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1983). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.5046202>

12. **Битюцких С.Ю., Спиридонов Е.К.** Исследование и расчет гидродинамики в струйном насосе // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 5-15. DOI: 10.14529/engin160101

13. **Reddy Y.R. & Kar S.** Theory and performance of water jet pump, Trans. ASCE J. Hyd. Div., 94(5) (1968), 1261-1281.

Критерии авторства

Снежко В.Л., Бенин Д.М., Кобозев Д.Д. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 09.10.2021 г.

Одобрена после рецензирования 18.10.2021 г.

Принята к публикации 01.11.2021 г.

Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 3. – С. 86-91.
DOI 10.26897/1997-6011-2020-3-86-91

8. **Snezhko V.L.** Sovremennye sposoby obrabotki dannyh v issledovaniyah gidravlicheskih soprotivlenij turbulentnyh potokov // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzhja. – 2011. – № 1. – С. 179-185.

9. **Idelchik I.E.** Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / pod red. M.O. Shteinberga. – 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroyeniye, 1992. – 672 s.

10. **Wilcox D.C.** Turbulence Modeling for CFD [Text]: 3rd ed. / D.C. Wilcox. – California: DCW Industries, 2006. – 515 p.

11. **Sugati D., & Effendy M.** (2018). RANS study of the liquid jet gas ejector. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1983). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/1.5046202>

12. **Bityutskih S.Yu., Spiridonov E.K.** Issledovanie i raschet gidrodinamiki v strujnom nasose // Vestnik YUUrGU. Seriya «Mashinostroyeniye». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 5-15. DOI: 10.14529/engin160101

13. **Reddy Y.R. & Kar S.** Theory and performance of water jet pump, Trans. ASCE J. Hyd. Div., 94(5) (1968), 1261-1281.

Criteria of authorship

Snezhko V.L., Benin D.M., Kobozev D.D. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 09.10.2021

Approved after reviewing 18.10.2021

Accepted for publication 01.11.2021