

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-81-89>

УДК 532.5:532.533:627.844



ИНЖЕКЦИОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ РАСХОДА С ПЛОСКИМИ ДИФFUЗОРАМИ

В.Л. Снежко¹, А.А. Гайсин², М.С. Палиивец³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

² Московский фонд реновации жилой застройки; 109012, г. Москва, ул. Ильинка, 13, Россия

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

Аннотация. Инжекционные регуляторы расхода являются водопропускными сооружениями, устанавливаемыми на каналах оросительных систем. Отличительной особенностью этих гидроавтоматов является отсутствие подвижных элементов. Для проектирования сооружений и оценки возможности установки на канале инжекционного водовыпуска с конкретной формой исполнения проточной части служат расходные характеристики. Большинство инжекционных водовыпусков имеет сопло в конце транзитной части, необходимое для увеличения скорости потока, поступающего в нижний бьеф, то есть его инжектирующей способности. Концевой участок оборудуется внезапным расширением или диффузором. Материалом исследований стали данные физического моделирования работы регулятора с плоским диффузором при отсутствии сопла. В качестве методов численного моделирования определены положения границы раздела потоков в камере смешения. Построена расходная характеристика регулятора и подтверждена приемлемость существующих расчетных зависимостей для определения инжектирующего и инжектируемого расходов водовыпуска. Сравнение расходных характеристик показало, что при прочих равных условиях отсутствие сопла снижает как коэффициент инжекции, так и относительный напор регулятора. Впервые изучено образование гидравлического прыжка на крышке плоского диффузора в промежуточном бьефе. Впервые приведены расчетные зависимости, позволяющие связать сопряженные глубины в промежуточном бьефе с точностью регулирования, а также даны рекомендации по изменению геометрических параметров промежуточного бьефа из условий точной подачи инжектируемого расхода.

Ключевые слова: гидравлика, гидротехнические сооружения, инжекция, регуляторы расхода, гидравлический прыжок

Формат цитирования: Снежко В.Л., Гайсин А.А., Палиивец М.С. Инжекционные регуляторы расхода с плоскими диффузорами // Природообустройство. 2025. № 1. С. 81-89. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-81-89>

Research article

INJECTION FLOW REGULATORS WITH FLAT DIFFUSERS

V.L. Snezhko¹, A.A. Gaisin², M.S. Paliivets³

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering; 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russia

² Moscow Housing Renovation Fund; 13 Ilyinka St., Moscow, 109012, Russia

³ Russian State Agrarian University Moscow State Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; Timiryazevskaya str., 49, Moscow, 127434, Russia

Abstract. Injection flow controllers are culverts installed on the canals of irrigation systems. A distinctive feature of these hydraulic automatics is the absence of movable elements. For the design of structures and assessment of the possibility of installation on the channel of the injection outlet with a specific form of the flow part, flow characteristics are used. Most injection outlets have a nozzle at the end of the transit portion necessary to increase the velocity of the flow entering the downstream pool, i.e. its injection capacity. The end section is equipped with a sudden expansion or diffuser. The material of the study was the data of physical modeling of the operation of the regulator with a flat diffuser in the absence of a nozzle. The positions of the interface between the streams in the mixing chamber were determined using numerical modeling methods. The flow characteristic of the regulator was built and the acceptability of the existing design relationships for determining the injected and injected flow rates of the water outlet was confirmed. Comparison of flow characteristics showed that, all other things being equal, the absence of a nozzle reduces both the injection coefficient and the relative head of the regulator. For the first time, the formation of a hydraulic jump on the cover of a flat diffuser in the intermediate pool was studied. For the first time, design relationships are given that make it possible to associate the conjugate depths in the intermediate

pool with the accuracy of control, as well as recommendations are given for changing the geometric parameters of the intermediate pool based on the conditions for accurate injection of the injected flow rate.

Keywords: hydraulics, hydraulic structures, injection, flow regulators, hydraulic jump

Format of citation: Snezhko V.L., Gaisin A.A., Paliivets M.S. Injection flow regulators with flat diffusers // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. P. 81-89. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-81-89>

Введение. По данным службы Государственной статистики, ежегодно на нужды орошения и сельскохозяйственного водоснабжения используется порядка 6,5 млрд м³ свежей воды, что составляет 13% от общего объема водозабора. Внедрение водо- и энергосберегающих технологий в орошении является актуальной задачей развития мелиоративного комплекса Российской Федерации. Одним из направлений снижения потерь воды в оросительных каналах и непроемчатых сбросов является внедрение средств гидравлической автоматизации, не использующих электрическую энергию для осуществления процесса управления. В работе [1] в качестве основных конструктивных недостатков автоматических регуляторов расхода указана низкая надежность подвижных частей сооружений, повреждения которых приводят к возникновению постепенных отказов.

Одними из автоматических регуляторов расхода, в проточной части которых отсутствуют любые подвижные элементы, являются инжекционные водовыпуски. Инжекционные водовыпуски-регуляторы используются на оросительных каналах для дискретного регулирования расхода в случае снижения водопотребления в нижнем бьефе, которое может быть вызвано, в том числе, внезапной остановкой дождевальных машин. Расходная характеристика регуляторов, имеющих различную форму исполнения проточной части, позволяет оценить возможность использования сооружения в условиях конкретного канала.

Расходная характеристика инжекционного регулятора без диффузорного выходного участка приведена в исследованиях [2]. Регулятор имел сопло и камеру смешения постоянной площади. При построении расходной характеристики в расчет включались полные гидравлические потери в пределах проточного тракта регулятора: местные потери и потери на трение по длине. Аналогичные исследования были выполнены в работе [3] для инжекционного регулятора с соплом и пирамидальным диффузором, расположенным за камерой смешения. Диффузор имел угол горизонтального расширения 10° и угол расширения в вертикальной плоскости 5° при степени расширения, равной двум.

Результаты исследований инжекционных регуляторов без сопла с пирамидальным

диффузором приведены в работе [4]. Конструкция имела камеру смешения длиной $3d$ и диффузор с расширением в трех плоскостях (угол расширения в горизонтальной плоскости составлял 20°, в вертикальной плоскости – 5°). Степень расширения диффузора равна 3, сбойность течения предотвращали укороченные разделительные стенки. Полученные теоретические зависимости не включали в себя сопротивление на трение по длине. Кроме того, при вычислении напоров между верхним, нижним и промежуточным бьефами использовали определенные допущения при учете потерь напора на местных сопротивлениях.

Один из методов расчета струйных насосов, основанный на теории смешения потоков в тройниках, был предложен П.Н. Каменевым. Этот метод был использован для расчетного обоснования проточной части гидродинамических регуляторов расхода, изученных в работе [5]. Проточная часть регуляторов включала в себя диафрагму и пирамидальный диффузор.

Анализ картины течения потоков в пределах проточного тракта позволил сделать вывод о том, что в основе работы сооружения также лежит эффект инжекции. Для гидравлического расчета автор рассматривал узел слияния потоков как вытяжной тройник. Применительно к особенностям конструкции регулятора это являлось определенным допущением и требовало дальнейшего уточнения местных сопротивлений с учетом отсутствия участка стабилизации течения за местом слияния.

Внесение сопла в проточную часть инжекционных регуляторов способствует увеличению скоростей инжектирующего потока, но одновременно делает более жесткими требования, предъявляемые к строительству и последующей эксплуатации сооружений. При строительстве необходима тщательная затирка бетонных поверхностей вблизи камеры слияния, при эксплуатации необходимо предотвращение попадания в транзитную часть водовыпуска сора, который может попасть в узкую часть сопла, и т.д. Тем не менее эффект инжекции может быть использован в регуляторах, выходная часть которых выполнена в форме диффузора, но сопло в конце трубчатой части отсутствует. Трубчатый водовыпуск-регулятор с плоским диффузором, размещенный в канале, приведен на рисунке 1.

Работа сооружения может быть рассмотрена как процесс инъекции, возникающий при снижении водопотребления в нижнем бьефе. Рост уровня нижнего бьефа формирует поток, переливающийся через водослив 5 и поступающий в промежуточный бьеф 7. При этом расход, проходящий по трубе 2, инжектирует поток из промежуточного бьефа через отверстие 3, и суммарный расход поступает в диффузор 6, имеющий две разделительные стенки для выравнивания скоростного поля, препятствующие возникновению сбойных течений, так как степень расширения диффузора равна 4 при угле расширения 30° . На крышке диффузора 7 после водослива может возникать гидравлический прыжок, так как она имеет нулевой уклон, то есть диффузор является плоским, расширяющимся только в горизонтальной плоскости. Для регулирования расхода с заданной точностью необходимо, чтобы между нижним бьефом и выходной частью регулятора циркулировал расход, соответствующий излишкам водоподачи.

Существующие теоретические методы расчета (рис. 1) регулятора были основаны на рассмотрении потерь, возникающих в зоне слияния потоков, как потерь в вытяжных тройниках. При достаточной универсальности решений эти методы не позволяли в явном виде получить зависимости для каждого из расходов и связать уровень промежуточного бьефа с точностью регулирования, дать рекомендации по требуемым конструктивным параметрам промежуточного бьефа. При рассмотрении течения в регуляторе как инъекционного указанные проблемы могут быть решены.

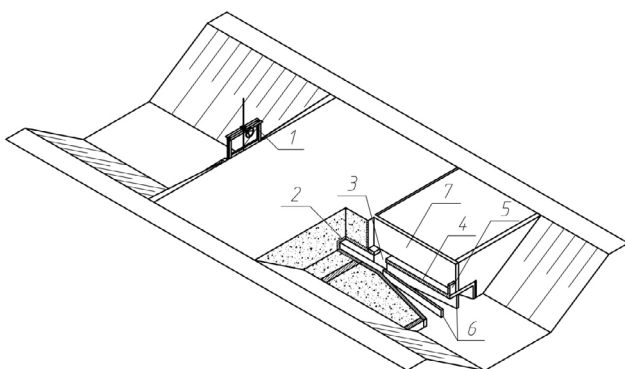


Рис. 1. Водовыпуск-регулятор с плоским диффузором:

- 1 – затвор; 2 – трубчатая часть; 3 – отверстие;
- 4 – крышка диффузора; 5 – водослив;
- 6 – диффузор с разделительными стенками;
- 7 – промежуточный бьеф

Fig. 1. Water outlet-regulator with flat diffuser:

- 1 – gate valve; 2 – tubular part;
- 3 – hole; 4 – diffuser cover; 5 – weir;
- 6 – diffuser with separating walls; 7 – intermediate pool

Исследований, посвященных гидравлической картине течения в промежуточном бьефе инъекционных регуляторов, в настоящее время нет.

Цель исследований: получение расходной характеристики инъекционного регулятора расхода с плоским диффузором без сопла, учитывающей гидравлические потери в пределах проточного тракта, верификация теоретических зависимостей данными физического и численного моделирования, а также разработка методики гидравлического расчета течения в промежуточном бьефе регулятора.

Материалы и методы исследований. Материалом исследований стали данные гидравлических испытаний физической модели инъекционного регулятора с плоским диффузором (рис. 2).

Модель сооружения была выполнена из органического стекла в линейном масштабе 1:10 и испытана в зеркальном гидравлическом лотке кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Лоток имел общую длину 15 м и был разделен напорной стенкой 3 на бьефы, между которыми расположена модель водовыпуска. При рассмотрении регулятора как своеобразного струйного насоса, расположенного между верхним и нижним бьефами, можно выделить следующие особенности модели: длина трубчатой части для подачи инжектирующего потока – $5.3d$; длина камеры смешения (инъекционной камеры) – d ; длина диффузора – $5.5d$; длина промежуточного бьефа, из которого поступал инжектируемый поток, – $6.8d$; максимальная высота промежуточного бьефа была равна высоте водосливного порога над крышкой диффузора и составляла d .

Эксперимент включал в себя 90 опытов, выполненных в условиях повторяемости. Числа Рейнольдса $1,01 \cdot 10^5 \div 1,45 \cdot 10^5$ обеспечивали проведение эксперимента в зоне автомодельности. Масштаб моделирования распространялся на шероховатость материала стенок модели. Точность экспериментальных данных была оценена суммарными относительными ошибками как для непосредственно, так и для косвенно измеряемых величин: глубина – 3,1%; расход – 2,3...4%; давление – 1,8%; скорость потока со свободной поверхностью – 3,4%; коэффициенты местных гидравлических сопротивлений – 2,5%.

К данным физического эксперимента применены методы гибридного моделирования, включающие в себя численное моделирование течения в пределах проточного тракта инъекционного регулятора в пакете STAR-СМ с граничными условиями, полученными на физической

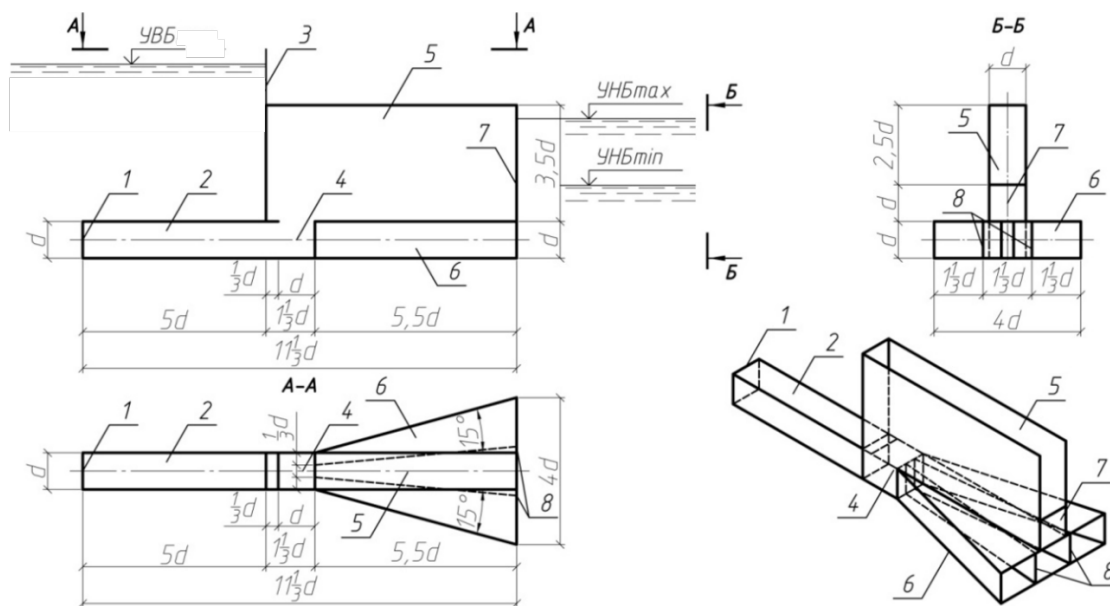


Рис. 2. Модель инжекционного водовыпуска-регулятора:

1 – входной оголовок; 2 – транзитная труба; 3 – напорная стенка; 4 – камера смешения; 5 – промежуточный бьеф; 6 – плоский диффузор; 7 – водослив; 8 – разделительные стенки

Fig. 2. Model of injection water outlet-regulator:

1 – inlet tip; 2 – transit pipe; 3 – pressure wall; 4 – mixing chamber; 5 – intermediate pool; 6 – flat diffuser; 7 – weir; 8 – separation walls

модели. Вид модели с расчетной сеткой приведен на рисунке 3.

В качестве теоретических методов исследований, позволивших получить зависимости для определения гидравлических параметров регулятора, использованы методы классической гидродинамики, в том числе теории струйных насосов.

В теории и проектировании водоструйных насосов, к которым можно отнести инжекционные регуляторы расхода, используются универсальные гидравлические характеристики, предложенные в свое время Л.Г. Подвидзом и Ю.Л. Кирилловским. Такими характеристиками являются безразмерные параметры: относительный напор h' , коэффициент инжекции u и относительная площадь k' . В принятых обозначениях относительный напор определяется как

$$h' = \frac{H_2}{H_1 - H_2}, \tag{1}$$

где H_1 – разность отметок между уровнем воды в верхнем бьефе и промежуточном бьефе, м; H_2 – разность отметок между уровнем воды в нижнем бьефе и промежуточном бьефе, м.

Очевидно, что напор на регулятор будет равен разности относительных напоров $H = H_1 - H_2$.

Коэффициент инжекции регулятора –

$$u = \frac{Q_0}{Q_1}, \tag{2}$$

где Q_0 – расход инжектируемого потока, м³/с; Q_1 – расход инжектирующего потока, м³/с.

Коэффициенты инжекции, значения которых не превосходят 1, считаются малыми. Относительная площадь вычисляется для входного сечения камеры смешения по зависимости:

$$k' = \frac{\omega_0}{\omega_1}, \tag{3}$$

где ω_1 – площадь инжектирующего потока, м²; ω_0 – площадь инжектируемого потока, м².

Для определения величины инжектируемого Q_0 и инжектирующего Q_1 потоков использовались методы, изложенные в работе [3]:

$$Q_1 = \omega_1 \cdot \left(\frac{-2gH_1 B^2 - 2AC}{2 \cdot (B^2 \zeta_{V_1} - A^2)} + \sqrt{\frac{(2gH_1 B^2 + 2AC)^2 + 4 \cdot (B^2 \zeta_{V_1} - A^2) \cdot C^2}{2 \cdot (B^2 \zeta_{V_1} - A^2)}} \right)^{0.5}; \tag{4}$$

$$Q_0 = \omega_0 \cdot \left(\frac{\zeta_{V_1} V_1^2}{\zeta_{V_0}} - \frac{2gH_1}{\zeta_{V_0}} \right)^{0.5}, \tag{5}$$

где А, В, С – константы, зависящие от формы исполнения проточной части и уровней воды в верхнем, нижнем и промежуточном бьефах; ω_0, ω_1 – площадь поперечного сечения инжектируемого и инжектирующего потоков в камере смешения, м²; H_1 – разность отметок в верхнем и промежуточном бьефах; ζ_{V_1} – приведенный коэффициент сопротивления инжектирующего потока между сечением на входе в трубчатую часть и сечением в камере смешения; ζ_{V_0} – приведенный коэффициент сопротивления инжектируемого потока при поступлении из промежуточного бьефа до сечения в камере смешения.

В свою очередь, значения констант зависят от отношений площадей инжектируемого потока w_0 , инжектирующего потока w_1 и камеры смешения w_2 , приведенных коэффициентов сопротивлений ζ_{V_1} , ζ_{V_0} и коэффициента сопротивления диффузора ζ_d . Константа C включает в себя также напор верхнего и нижнего бьефов над промежуточным бьефом H_1 и H_2 .

Результаты и их обсуждение. Гибридное моделирование течений в инжекционных насосах успешно применяется в ряде исследований [6, 7]. К примеру, в работе [8] методами физического и численного моделирования в пакете StarCD CFD было изучено влияние размеров сопла и камеры смешения, в модели использована модель турбулентности $k-\epsilon$. Для моделирования течения в пределах проточной части инжекционного регулятора также была использована модель турбулентности $k-\epsilon$. Примеры трехмерных моделей приведены на рисунке 4.

Сопло является обязательным элементом струйных насосов. Оно стесняет выходное сечение трубчатой части и служит для увеличения скоростей инжектирующего потока перед слиянием. В этом случае в уравнениях 4 и 5 площадь инжектирующего потока w_1 определялась бы как площадь сопла в свету, а площадь инжектируемого потока w_0 представляла бы собой разность между площадью камеры смешения w_2 и площадью инжектирующего потока. Поскольку проточная часть регулятора (рис. 2) не имела жесткого сопла, в качестве сопла предложено рассматривать границу раздела инжектирующего и инжектируемого потоков в камере смешения.

Определение граничной линии тока было выполнено методами численного моделирования. Линия раздела потоков имела различное

положение во всем диапазоне работы модели инжекционного регулятора и зависела от величины сливающихся расходов. Моделирование показало, что в зависимости от величины сливающихся расходов инжектирующий поток может занимать до 20% камеры смешения, максимум достигается при максимальном значении коэффициента инжекции. При этом в зависимости от уровней воды в бьефах относительная площадь k' для каждого коэффициента инжекции u в экспериментах изменялась от 0,15 до 0,21, с ростом коэффициента инжекции происходило увеличение относительной площади.

Уравнение безразмерной характеристики инжекционного регулятора являлось функцией от коэффициента инжекции u и относительного напора h' , в которой потери удельной энергии в пределах проточного тракта учитывались гидравлическими сопротивлениями, вычисленными по формуле Дарси-Вейсбаха. В относительных величинах уравнение расходной характеристики имело вид $u = f(H_2/H)$, где коэффициент

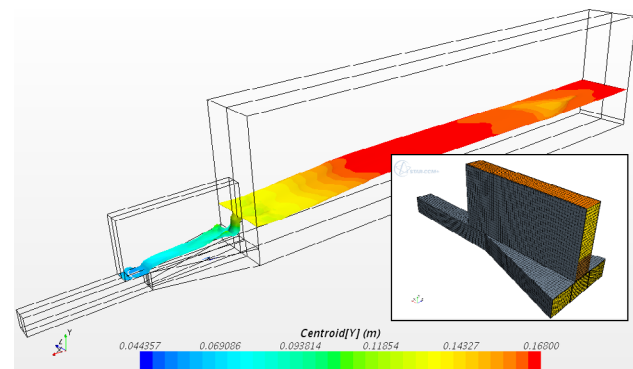


Рис. 3. Модель регулятора и расчетная сетка в пределах проточного тракта сооружения
Fig. 3. Regulator model and design grid within the flow path of the structure

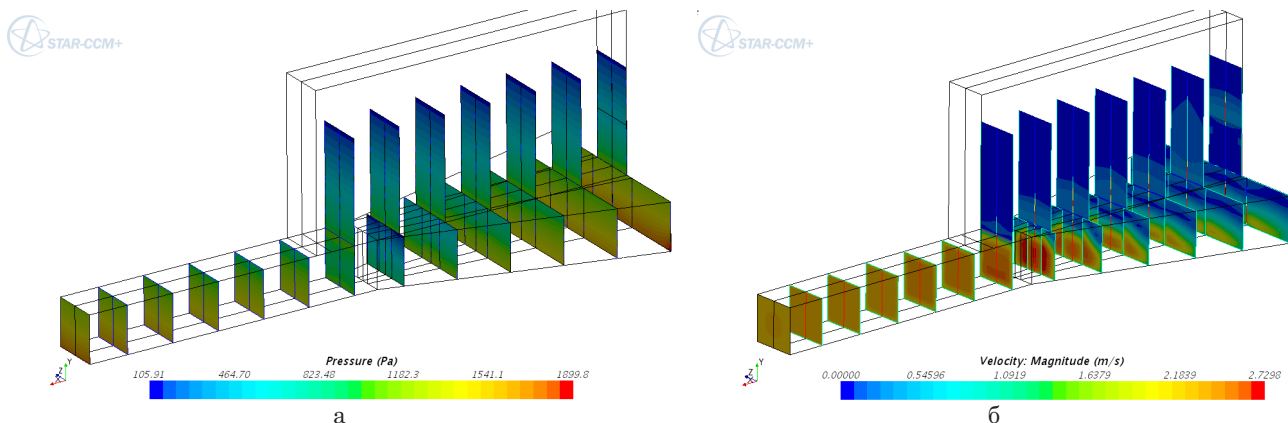


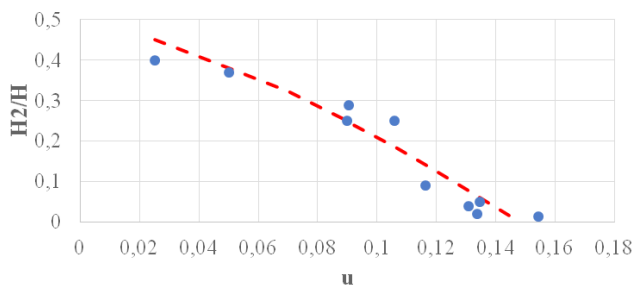
Рис. 4. Пример моделирования гидравлических параметров регулятора:
а – распределение давления; б – распределение скорости

Fig. 4. Example of modeling the hydraulic parameters of the regulator:
a – pressure distribution; b – speed distribution

инъекции вычислялся по ф.2, а значения расходов: инжектируемого Q_0 и инжектирующего Q_1 – вычислялись по ф.4 и ф.5 для различных положений верхнего, нижнего и промежуточного бьефов. Для каждого значения коэффициента инъекции u было построено поле точек, которое условно может быть названо расходной характеристикой регулятора без сопла (рис. 5).

Условность объясняется тем, что в струйных насосах или инжекционных регуляторах с жестким соплом расходная характеристика имеет вид кривой, соответствующей единственному значению относительной площади, при этом площадь инжектирующего потока в ф.3 принимается равной площади сопла. Пунктирная кривая (рис. 5) построена при изменяющихся значениях k' . Максимальный коэффициент инъекции порядка 0,16 достигается при минимальном относительном напоре. При максимальном относительном напоре порядка 0,4 коэффициент инъекции будет минимальным и равным 0,02. Меньшие значения коэффициента инъекции при существующей форме исполнения проточной части инжекционного регулятора получить невозможно вследствие захвата воздуха в отверстие 3 (рис. 1). Более высокие значения получить невозможно, так как происходит полное затопление промежуточного бьефа и выравнивание уровня воды в нем с уровнем воды в отводящем канале.

Сравнение расходной характеристики (рис. 5) с характеристикой инжекционных регуляторов с соплом и диффузором [3] для пирамидального диффузора со степенью расширения 2 при относительной управляющей площади $k' = 1$ показывает, что внесение сопла увеличивает максимально возможный коэффициент инъекции почти в 3 раза и относительный напор – в 2 раза. Форма расходной кривой для инжекционных регуляторов без сопла аналогична форме



Экспериментальные значения — — — теоретические значения

Рис. 5. Расходная характеристика инжекционного регулятора без сопла с плоским диффузором

Fig. 5. Flow characteristic of injection regulator without nozzle with flat diffuser

кривой с соплом. Из теории струйных насосов известно, что при одинаковых коэффициентах инъекции при прочих равных условиях относительный напор устройств без диффузора может быть на 40...70% ниже, чем при наличии диффузора.

При сравнении расходной характеристики (рис. 5) с характеристикой [2], полученной для инжекционного регулятора с соплом и камерой смешения в виде внезапного расширения при $k' = 1$, также можно отметить, что бездиффузорные конструкции с соплом имеют максимальный коэффициент инъекции – выше в 2,5 раза, а максимальный относительный напор – больше в 1,7 раза. Устройство диффузора или камеры смешения в виде внезапного расширения приводит к существенному росту относительного напора. Другими словами, при установке инжекционного регулятора в каналах, имеющих достаточно большой перепад в створе перегородаживающего сооружения, под которым расположен регулятор, предпочтение следует отдавать формам исполнения проточной части, включающим в себя сопло. При малых перепадах уровня воды можно применять конструкции без сопла с диффузорными выходными участками.

Изучение режима течения в промежуточном бьефе было выполнено на модели при различных значениях коэффициента инъекции. Схема для гидравлического расчета и пример течения приведены на рисунке 6.

Промежуточный бьеф формировался в призматической области с длиной $5,5d$ и с постоянной шириной d , высота водосливного порога над крышкой диффузора составляла d . Для всех экспериментов была определена критическая глубина в промежуточном бьефе:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (6)$$

где α – коэффициент Кориолиса; q – удельный расход, m^3/c , $q = Q_0/b$ (здесь b – ширина промежуточного бьефа в направлении, перпендикулярном течению потока, м); Q_0 – инжектируемый расход, определяемый по зависимости (5), m^3/c .

Значения критической глубины во всех экспериментах составляли $h_{кр} = (0,6...0,8) p$, где p – высота водосливного порога (рис. 6а). Поток в промежуточном бьефе за водосливом находился в бурном состоянии, так как соответствующие значения сжатой глубины h_c были меньше, чем критические. Известно, что создание внезапной преграды по течению стационарного сверхкритического потока (бурного потока) приводит к возникновению обратной положительной волны, распространяющейся вверх по течению и представляющей собой гидравлический прыжок [9].

При этом сжатая глубина будет являться первой сопряженной глубиной, то есть $h_c = h'$.

Под точностью регулирования инъекционных водовыпусков понимается обеспечение циркуляции расхода Q_0 (излишков водоподачи) при известном уровне нижнего бьефа в отводящем канале, возникающем при сокращении водопотребления ниже створа перегораживающего сооружения. Другими словами, уровню нижнего бьефа должен соответствовать конкретный инжектируемый расход. Для инъекции расхода Q_0 необходимо, чтобы в конце промежуточного бьефа был обеспечен напор, равный H_2 . Вторая сопряженная глубина гидравлического прыжка в промежуточном бьефе (рис. 6а) –

$$h'' = H_{\text{вод}} + p - H_2, \quad (7)$$

где $H_{\text{вод}}$ – напор над водосливом, м; p – высота водосливного порога над крышкой диффузора, м.

Напор на водосливе в нижнем бьефе $H_{\text{вод}}$ определяется как расход воды обратной волны, которая возникает при снижении водопотребления в отводящем канале от максимального до минимального значений:

$$H_{\text{вод}} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{B_{\text{кан}} \cdot \sqrt{\frac{g \omega_{\text{кан}}}{B_{\text{кан}}}}}, \quad (8)$$

где Q_{max} – расход при максимальном водопотреблении, м³/с; Q_{min} – расход при минимальном водопотреблении, м³/с; $B_{\text{кан}}$ – ширина канала по урезу воды, м; $\omega_{\text{кан}}$ – площадь поперечного сечения канала, м².

Первая сопряженная глубина определяется по зависимости:

$$h' = 0.5h'' \cdot \sqrt{1 + 8 \left(\frac{h''}{h'} \right)^3} - 1, \quad (9)$$

где h'' – вторая сопряженная глубина, м.

При возникновении гидравлического прыжка на крышке диффузора в промежуточном бьефе возможны следующие виды прыжка: прыжок в предельном состоянии, образующийся непосредственно за водосливом; надвинутый гидравлический прыжок; отогнанный гидравлический прыжок (рис. 6б). Отогнанный гидравлический прыжок является менее предпочтительным.

Полученное по ф.9 значение первой сопряженной глубины необходимо обеспечить, исходя из условий поступления расхода Q_0 через водослив. В этом случае значение первой сопряженной глубины может быть получено при рассмотрении течения за водосливом в результате решения кубического уравнения [9]:

$$(p - H_{\text{вод}0}) \cdot (h')^2 - (h')^3 = \frac{q^2}{\phi^2 2g}, \quad (10)$$

где $H_{\text{вод}0}$ – напор над водосливом с учетом скорости подхода, м; p – высота водосливного порога над крышкой диффузора, м; j – коэффициент скорости.

Напор на водосливе с учетом скорости подхода $H_{\text{вод}0}$ можно определить, приближенно приняв скорость потока перед водосливом

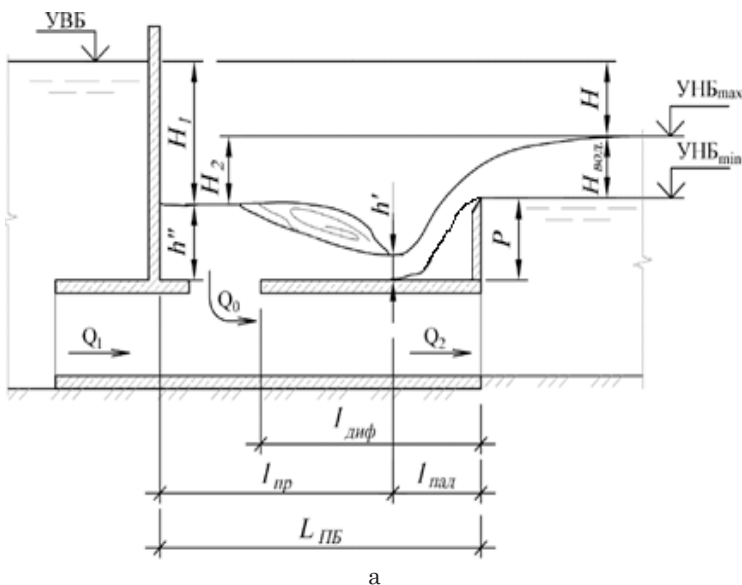


Рис. 6. Промежуточный бьеф инъекционного регулятора:

а – схема для гидравлического расчета; б – гидравлический прыжок на крышке диффузора

Fig. 6. Intermediate pool of the injection regulator discharge:

a – diagram for hydraulic calculation; б – hydraulic jump on the diffuser cover

равной скорости обратной волны, возникающей в отводящем канале при снижении водопотребления:

$$H_{\text{вод0}} = H_{\text{вод}} + \frac{v_{\text{вод}}^2}{2g}, \quad (11)$$

где $v_{\text{вод}}$ – скорость потока перед водосливом, $v_{\text{вод}} \approx (g\omega_{\text{кан}} \cdot B_{\text{кан}}^{-1})^{0.5}$.

Основным условием, обеспечивающим точность регулирования, должна быть такая привязка инжекционного регулятора к уровням бьефов в створе перегораживающего сооружения, которая обеспечит равенство значений первой сопряженной глубины h' , полученных по уравнениям (9) и (10). Это может быть достигнуто изменением геометрических параметров промежуточного бьефа. К таким величинам относятся: ширина водосливного фронта b ; ширина промежуточного бьефа в направлении, перпендикулярном течению инжектируемого потока по крышке диффузора $b_{\text{пб}}$; длина промежуточного бьефа $L_{\text{пб}}$.

При варьировании высоты водосливного порога p следует иметь в виду, что кромка водослива должна располагаться на отметке, соответствующей уровню воды в отводящем канале при максимальном водопотреблении, а выходное сечение диффузора необходимо заглубить под этот уровень как минимум на 2...3 скоростных напора.

В общем случае длина промежуточного бьефа $L_{\text{пб}}$ состоит из длины падения струи $l_{\text{пад}}$, поступающей через водослив, и длины гидравлического прыжка $l_{\text{пр}}$ на крышке диффузора (рис. 6а). Длина падения струи за водосливной стенкой $l_{\text{пад}}$ может быть определена по формуле:

$$l_{\text{пад}} = 0.33 \cdot H_{\text{вод0}} + 1.38 \sqrt{H_{\text{вод0}} \cdot (p + 0.45 \cdot H_{\text{вод0}})}.$$

Для определения длины гидравлического прыжка существуют как классические, так

и новые зависимости [11, 12]. Она может быть определена по формуле М.Д. Чертоусова:

$$l_{\text{пр}} = 10.3h' \cdot \left(\sqrt{\frac{h_{\text{кр}}^3}{h'}} - 1 \right)^{0.81}.$$

В случае, когда длина промежуточного бьефа превышает длину крышки диффузора, возможно сопряжение нижнего и промежуточного бьефов в виде надвинутого гидравлического прыжка. При исполнении промежуточного бьефа с расширением в направлении течения инжектируемого потока (повторяющим форму крышки диффузора) возможно использование зависимостей для затопленного гидравлического прыжка в расширяющемся прямоугольном русле с центральным углом роспуска $15^\circ \div 45^\circ$ на гладком горизонтальном дне [13].

Выводы

В результате выполненных исследований подтверждена приемлемость расчетных зависимостей, применяемых для определения расходов в инжекционных водовыпусках, для гидравлического расчета регуляторов без сопла с плоским диффузором на конечном участке.

Построена расходная характеристика инжекционного водовыпуска с плоским диффузором и выполнено ее сравнение с регуляторами, имеющими сопло, внезапное расширение или диффузор. При прочих равных условиях отсутствие сопла снижает как коэффициент инжекции, так и относительный напор регулятора.

Впервые изучено образование гидравлического прыжка на крышке плоского диффузора в промежуточном бьефе. Впервые приведены расчетные зависимости, позволяющие связать сопряженные глубины в промежуточном бьефе с точностью регулирования, а также даны рекомендации по изменению геометрических параметров промежуточного бьефа из условий точной подачи инжектируемого расхода.

Список использованных источников

1. Круглова В.В. Классификация и анализ отказов автоматизированных водовыпускных сооружений на каналах оросительных систем // Вестник КРСУ. 2012. Т. 12, № 6. С. 33-35.
2. Снежко В.Л. Расходные характеристики инжекционных водовыпусков-регуляторов / В.Л. Снежко, Д.Д. Кобозев // Природобустройство. 2023. № 5. С. 111-117. DOI: 10.26897/1997601120235-111-117.
3. Снежко В.Л. Расходная характеристика инжекционных регуляторов с соплом и диффузором / В.Л. Снежко, Д.Д. Кобозев // Гидротехническое строительство. 2024. № 11. С. 52-57.
4. Кобозев Д.Д. Сравнение гидравлических характеристик инжекционных регуляторов с различной формой исполнения выходного участка / Д.Д. Кобозев, В.Л. Снежко // Гидротехническое строительство. 2023. № 2. С. 29-33.

References

1. Kruglova V.V. Classification and analysis of failures of automated water outlet facilities on irrigation system channels // Bulletin of the KRSU. 2012. Vol. 12, No. 6. pp. 33-35.
2. Snezhko V.L. Consumption characteristics of injection water outlets / regulators / V.L. Snezhko, D.D. Kobozev // Prirodobustrojstvo. 2023. No. 5. pp. 111-117. DOI: 10.26897/1997601120235-111-117.
3. Snezhko V.L. Consumption characteristics of induction regulators with nozzle and diffuser / V.L. Snezhko, D.D. Kobozev // Hydraulic engineering. 2024. No. 11. pp. 52-57.
4. Kobozev D.D., Snezhko V.L. Comparison of hydraulic characteristics of injection regulators with various forms of output section design // Hydraulic engineering construction. 2023. No. 2. pp. 29-33.

5. Гайсин А.А. Способ совершенствования гидродинамических регуляторов расхода // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 3 (19). С. 159-170.
6. Omidvar A., Ghazikhani M., Modarres Razavi SMR. Entropy analysis of a solar driven variable geometry ejector using computational fluid dynamics. *Energy Convers Manage*. 2016. № 119. Pp. 435-43. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.090.
7. Wu H., Liu Z., Han B., Li Y. Numerical investigation of the influences of mixing chamber geometries on steam ejector performance. *Desalination*. 2014. № 353. Pp. 15-20. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.002.
8. Flow Analysis for Single and Multi-Nozzle Jet Pump / T. Narabayashi, Y. Yamazaki, H. Kobayashi, T. Shakouchi // *JSME International Journal Series B*. 2006. Vol. 49, № 4. Pp. 933-940.
9. Букреев В.И. Внезапное перекрытие сверхкритического потока в открытом канале / В.И. Букреев, А.В. Гусев // *Прикладная механика и техническая физика*. 2004. Т. 45, № 4 (266). С. 58-63.
10. Гурьев А.П. Влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока / А.П. Гурьев, Н.В. Ханов, Н.А. Волгин // *Природообустройство*. 2015. № 4. С. 48-51.
11. Мамедов А.Ш. Гидравлический прыжок на гладком и шероховатом дне // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2023. Т. 308. С. 67-82.
12. Сухов А.Д. Гидравлический прыжок для прямолинейного и осесимметричного течения жидкости / А.Д. Сухов, А.Г. Петров // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2023. Т. 164, № 5. С. 839-846. DOI: 10.31857/S0044451023110147.
13. Беглярова Э.С. Экспериментальные исследования затопленного гидравлического прыжка в непрямоугольном русле прямоугольного сечения при гладком горизонтальном дне / Э.С. Беглярова, А.М. Бакштанин, А.В. Дмитриева, С.А. Соколова, Д.П. Михайлец // *Природообустройство*. 2018. № 3. С. 51-58. DOI: 10.26897/19976011/2018-3-51-58.

Об авторах

Вера Леонидовна Снежко, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; SPIN-код: 9528-8890; AuthorID: 696880; Scopus Author ID: 57209333075; ResearcherID: ABG-5645-2020; <https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>; vl_snejko@mail.ru

Айнурт Альбертович Гайсин, канд. техн. наук, руководитель службы Управления цифрового развития и информационных технологий Московского фонда реновации жилой застройки; SPIN-код: 2628-2649, AuthorID: 780440; <https://orcid.org/0000-0001-5607-4728>; ainurt.g@yandex.ru

Максим Сергеевич Палиивец, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и инженерных расчетов; SPIN-код: 7783-7503, AuthorID: 705251; Scopus Author ID: 57217030624; ResearcherID: AAE-5800-2022; <https://orcid.org/0000-0002-2518-2141>; maxim6663@mail.ru

Критерии авторства / Authorship criteri

Снежко В.Л., Гайсин А.А., Палиивец М.С. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interes

Авторы заявляет об отсутствии конфликтов интересов / The authors declares that there are no conflicts of interest

Вклад авторов / Contribution of authors

Гайсин А.А. выполнил физическое и численное моделирование; Снежко В.Л. и Палиивец М.С. выполнили расчетную часть исследований.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 05.01.2025

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 29.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 29.01.2025

5. Gaisin A.A. A method for improving hydrodynamic flow regulators // *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems*. 2015. No. 3 (19). pp. 159-170.

6. Omidvar A., Ghazikhani M., Modarres Razavi SMR. Entropy analysis of a solar driven variable geometry vector using computational fluid dynamics. *Energy Converse Manage*. 2016. No. 119. Pp. 435-43. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.03.090.

7. Wu H., Liu Z., Han B., Li Y. Numerical investigation of the influence of mixing chamber geometries on steam ejector performance. *Desalination*. 2014. No. 353. Pp. 15-20. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.002.

8. Flow Analysis for Single and Multi-Nozzle Jet Pump / T. Nakabayashi, Y. Yamazaki, H. Kobayashi, T. Shakouchi // *ASME International Journal Series B*. 2006. Vol. 49, No. 4. Pp. 933-940.

9. Bukreev V.I. Sudden occlusion of supercritical flow in an open channel / V.I. Bukreev, A.V. Gusev // *Applied mechanics and technical physics*. 2004. Vol. 45, No. 4 (266). pp. 58-63.

10. Guryev A.P. The influence of the design parameters of a downhole on the damping of flow energy / A.P. Guryev, N.V. Khanov, N.A. Volgin // *Prirodoobustrojstvo*. 2015. No. 4. pp. 48-51.

11. Mammadov A.Sh. Hydraulic jump on a smooth and rough bottom // *Izvestiya VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 2023. Vol. 308. pp. 67-82.

12. Sukhov A.D. Hydraulic jump for rectilinear and axisymmetric fluid flow / A.D. Sukhov, A.G. Petrov // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2023. Vol. 164, No. 5. pp. 839-846. DOI: 10.31857/S0044451023110147.

13. Beglyarova E.S. Experimental studies of a flooded hydraulic jump in a non-prismatic channel of rectangular cross-section with a smooth horizontal bottom / E.S. Beglyarova, A.M. Bakshtanin, A.V. Dmitrieva, S.A. Sokolova, D.P. Mikhaylets // *Prirodoobustrojstvo*. 2018. No. 3. pp. 51-58. DOI: 10.26897/19976011/2018-3-51-58.

About the authors

Vera L. Snezhko, DSc (Eng), professor, professor of the department of hydraulics and hydro engineering construction; SPIN-code: 9528-8890; AuthorID: 696880; Scopus Author ID: 57209333075; ResearcherID: ABG-5645-2020; <https://orcid.org/0000-0002-3968-0563>; vl_snejko@mail.ru

Ainurt A. Gaisin, CSc (Eng); Head of the service of the Department of digital development and information technologies of the Moscow fund for the renovation of residential development; SPIN-code: 2628-2649, AuthorID: 780440; <https://orcid.org/0000-0001-5607-4728>; ainurt.g@yandex.ru

Maxim S. Paliivets, CSc (Eng); associate professor, associate professor of the department of the systems of automated designing and engineering calculations; SPIN-code: 7783-7503, AuthorID: 705251; Scopus Author ID: 57217030624; ResearcherID: AAE-5800-2022; <https://orcid.org/0000-0002-2518-2141>; maxim6663@mail.ru

Snezhko V.L., Gaisin A.A., Paliivets M.S. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they summarized and wrote the manuscript, have copyright to the article and are responsible for plagiarism.

Gaisin A.A. performed physical and numerical modeling; Snezhko V.L. and Paliivets M.S. performed the calculated part of the research.