

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 006.915:532.542(3):628.311

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>




Апробация перспективных технических решений в конструкции макета исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод

А. В. Щелчков^{1,2}  , Р. Р. Миннуллин^{1,2} , Р. А. Корнеев² , А. И. Горчев² ,
А. А. Корнеев³ , М. А. Щелчкова¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Россия

²ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», г. Казань, Россия

³ООО «АКТЕК», г. Санкт-Петербург, Россия

 avschelchkov@kai.ru

Аннотация: В Российской Федерации идет работа по созданию национального эталона единицы объемного расхода сточных вод наивысшей точности. За основу создания эталона взята практика измерений количества сточных вод в напорных и безнапорных трубопроводах (открытых каналах). При измерениях расхода воды в напорных трубопроводах накоплен значительный опыт и выстроена система метрологического обеспечения средств измерений. Однако измерения расхода воды в безнапорных трубопроводах – пока достаточно сложная метрологическая задача в силу гидродинамических особенностей формирования безнапорного небурного потока воды и недостатков существующей системы метрологического обеспечения.

Авторы статьи рассмотрели результаты первого этапа создания эталона единицы объемного расхода сточных вод наивысшей точности – создания макета исходного эталона.

Создание макета началось с анализа публикаций (Роспатент, Espacenet, Scopus, eLIBRARY.RU, ФГИС Росстандарта и др.) по заявленной теме. На основании обзора были выбраны технические и технологические решения, реализованные в основных системах макета и затем апробированные. Например, представлены подходы, которые позволят сформировать развитое небурное течение потока в открытом канале (лотке) с близким к двумерному профилю скорости в его поперечном сечении и обеспечат заданные метрологические характеристики в диапазоне объемного расхода Q_V от 1 до 100 м³/ч.

Апробированные перспективные технические решения в основных системах макета эталона позволили реализовать небурное течение потока в открытом канале (лотке); обеспечить заданные метрологические характеристики в заявленном диапазоне объемного расхода Q_V от 1 до 100 м³/ч; обеспечить поддержание температуры воды в баке накопительном и водяном контуре в заданном диапазоне температур от 15 до 25 °С; разработать инженерные рекомендации по определению тепловых притоков к воде в контуре макета эталона для формирования требований к мощности системы охлаждения воды на основе промышленно выпускаемых холодильных установок (чиллеров). Представленные в статье результаты экспериментальных исследований позволят приступить к проектированию и созданию исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод.

Создание собственного национального эталона единицы объемного расхода сточных вод наивысшей точности укрепит метрологический суверенитет и авторитет Российской Федерации на международной арене.

Ключевые слова: открытый канал, лоток, сточные воды, двумерный профиль скорости, пассивная закрутка потока, струевыпрямитель, хонейкомб

Для цитирования: Апробация перспективных технических решений в конструкции макета исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод / А. В. Щелчков [и др.] // Эталонные. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 4. С. 7–23. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>

Статья поступила в редакцию 23.07.2025; одобрена после рецензирования 14.10.2025; принята к публикации 25.12.2025.

MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

Testing of Promising Technical Solutions in the Design of a Prototype Initial Standard for the Measurement Unit of Volumetric Wastewater Flow Rate

Alexey V. Shchelchkov^{1,2}  , Ruslan R. Minnullin^{1,2} , Roman A. Korneev² , Aleksandr I. Gorchev² , Andrey A. Korneev³ , Marina A. Shchelchkova¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

²VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia

³Limited Liability Company «AKTEK», St. Petersburg, Russia

 avschelchkov@kai.ru

Abstract: In the Russian Federation, work is underway to create a national of the highest accuracy for the unit of volumetric wastewater flow rate. The development of this standard is based on measurement practices for wastewater quantity in both pressurized pipelines and non-pressurized pipelines (open channels). Significant experience has been accumulated in measuring water flow in pressurized pipelines, and a system for the metrological support of measuring instruments has been established. However, measuring water flow in non-pressurized pipelines remains a challenging metrological task due to the hydrodynamic specifics of forming a non-pressurized, non-turbulent water flow and the shortcomings of the existing metrological support system.

The authors of the article examined the results of the first stage in creating the highest-accuracy standard for the unit of volumetric wastewater flow rate – the creation of a model of a prototype initial standard. The development of the prototype began with an analysis of publications (from sources including Rospatent, Espacenet, Scopus, eLIBRARY.RU, and the Federal State Information System of Rosstandart, etc.) on the specified topic. Based on this review, technical and technological solutions were selected for implementation in the prototype's main systems and were subsequently tested. For example, the study presents approaches that enable the formation of a fully developed non-turbulent flow in an open channel (flume) with a nearly

two-dimensional velocity profile in its cross-section. These approaches are designed to ensure the required metrological characteristics across a volumetric flow range Q_V from 1 to 100 m³/h.

The proven promising technical solutions in the prototype standard's main systems have enabled the following: implementation of non-turbulent flow in an open channel (flume); achievement of the specified metrological characteristics within the declared range of volumetric flow rate Q_V from 1 to 100 m³/h; maintenance of the water temperature in the storage tank and the water circuit within the specified temperature range from 15 to 25 °C; development of engineering recommendations for determining heat influxes to the water in the prototype's circuit. These recommendations form the basis for defining the capacity requirements of the water cooling system, which is to be based on commercially available refrigeration units (chillers). The results of the experimental research presented in the article will pave the way for the design and development of an initial standard for the unit of volumetric wastewater flow.

The establishment of a national of the highest accuracy for the unit of volumetric wastewater flow rate will strengthen the metrological sovereignty and international standing of the Russian Federation.

Keywords: open channel, flume, wastewater, two-dimensional velocity profile, passive flow swirl, flow straightener, honeycomb

For citation: Shchelchkov A. V., Minnullin R. R., Korneev R. A., Gorchev A. I., Korneev A. A., Shchelchkova M. A. Testing of promising technical solutions in the design of a prototype initial standard for the measurement unit of volumetric wastewater flow rate. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(4):7–23 (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-4-7-23>

The article was submitted 23.07.2025; approved after reviewing 14.10.2025; accepted for publication 25.12.2025.

Введение

Законодательная база

Рациональное использование водных ресурсов во главу угла ставит контроль расходования всех видов воды в производственных и бытовых целях, в особенности холодной и горячей воды, сточных вод. Совершенствование механизма контроля предполагает:

- развитие инновационных экологически приемлемых и экономически эффективных технологий использования воды в качестве энергоносителя;

- создание систем коммерческого учета воды и сточных вод;

- оптимизацию затрат на организацию процессов подготовки и транспортировки воды, очистки, транспортировки и отвода сточных вод.

Полный комплекс задач и мероприятий в указанной сфере, включая перечисленные выше, зафиксирован законодательством Российской Федерации:

- энергетический компонент: Федеральный закон Российской Федерации № 261-ФЗ¹;

¹ Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской

- экономический компонент: Федеральный закон Российской Федерации № 416-ФЗ², постановление Правительства Российской Федерации № 776³;

- экологический компонент: Указы Президента Российской Федерации № 899, № 812⁴.

Место метрологии в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений средствами измерений (СИ) для коммерческого учета и хранения энергоресурсов (в том числе сточных вод) регламентирует Федеральный закон Российской Федерации

Федерации : Федеральный закон Российской Федерации от 23.11.2009 № 261-ФЗ.

² О водоснабжении и водоотведении : Федеральный закон Российской Федерации от 07.12.2011 № 416-ФЗ.

³ Об утверждении Правил организации коммерческого учета воды, сточных вод : Постановление Правительства Российской Федерации № 776 от 04.09.2013.

⁴ Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899.

№ 102-ФЗ⁵, который устанавливает правовые основы обеспечения единства измерений в Российской Федерации, а также защищает права и законные интересы граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений.

Актуальность исследования

В соответствии с 102-ФЗ и постановлением № 776 при измерениях количества сточных вод необходимо применять оборудование, являющееся СИ утвержденного типа. Измерения количества сточных вод могут проводиться в напорных и безнапорных трубопроводах (открытых каналах), где движение потока вод обеспечивается силой тяжести.

При измерениях расхода воды в напорных трубопроводах накоплен значительный опыт и выстроена система метрологического обеспечения данных СИ. Но при этом измерение расхода воды в безнапорных каналах является достаточно сложной метрологической задачей, обусловленной спецификой измерений (небольшими скоростями, наличием неоднородностей в потоке и прочим) и недостатками существующей системы метрологического обеспечения (отсутствием достаточного количества рабочих эталонов и недочетами реализации методов передачи единиц величин).

Отсутствие на данный момент отлаженной системы метрологического обеспечения измерений расхода и количества сточных вод в безнапорных (открытых) каналах вынуждает держателей СИ осуществлять их поверку (калибровку) либо на зарубежных эталонах, либо в эталонных установках с напорными трубопроводами.

Целенаправленность исследования

Цель представленного в статье исследования – апробация перспективных технических решений в основных системах макета эталона, которые позволят сформировать небурное течение потока в открытом канале (лотке) с близким к двумерному профилю скорости в его поперечном сечении и обеспечат заданные метрологические характеристики

⁵ Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон Российской Федерации от 26.06.2008 № 102-ФЗ.

в заявленном диапазоне объемного расхода Q_V от 1 до 100 м³/ч.

Для достижения цели будут решены задачи:

- 1) спроектировать и изготовить макет эталона единицы объемного расхода сточных вод;
- 2) апробировать перспективные технические решения в конструкции основных систем макета эталона;
- 3) выполнить экспериментальные исследования гидродинамических характеристик потока воды в открытом канале, режимных и метрологических характеристик.

Материалы и методы

Аналитическая база

Материалом для поиска технических и технологических решений по проектированию основных систем исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод (далее – эталона) послужили публикации в отечественной литературе (научных журналах и материалах научных конференций) и информационных поисковых (Роспатент, Espacenet, Scopus, eLIBRARY.RU, ФГИС Росстандарта и др.) и библиографических базах данных (eLIBRARY.RU, Scopus) с глубиной охвата от настоящего времени до 1980 г. В обзор включали публикации, доступные на 01.05.2025.

Динамика международной публикационной активности в области технических и технологических решений устройства эталонов демонстрирует стабильный ежегодный рост охранных документов и публикаций в открытых источниках. Необходимо отметить значительный рост числа охранных документов, зарегистрированных в Китайской Народной Республике за период с 2019 по 2023 г., что обусловлено обязательным требованием департамента охраны окружающей среды этого государства об ужесточении контроля и наблюдения за качеством сточных вод. В нашей стране тематика совершенствования эталонной базы в области контроля объемного расхода сточных вод развивалась не так активно, как за рубежом.

Материальная база

Для оценки обеспечения метрологической базы в области измерений объемного расхода сточных вод был выполнен обзор описаний типов СИ (установок поверочных), которые

предназначены для поверки (калибровки) СИ, зарегистрированных в «Аршин»⁶. В обзор вошли сведения из четырех описаний типа СИ:

- установка поверочная УПР СВ 600 (ООО «ЭНБРА-РУСС», Россия, г. Санкт-Петербург);
- установка поверочная для счетчиков JOS300 (фирма Sensus Metering Systems a. s., Словакия, г. Стара-Тура);
- установка расходомерическая открытого потока НЕГР (Опытно-экспериментальный завод «Водоавтоматика», Киргизия, г. Бишкек);
- установка гидродинамическая ГДУ-400/0,5 (ООО «МВЦ ВНИИМ», Россия, г. Санкт-Петербург).

Характеристики устройств

Рассмотрим конструкцию, принцип работы и опыт эксплуатации на территории Российской Федерации описанных выше установок поверочных на примере установки поверочной УПР СВ 600 (далее по тексту – установка, внешний вид – рис. 1).

Установка производит объемный расход в диапазоне от 0,5 до 200 м³ с пределами допускаемой погрешности $\pm 0,1\%$.

Состав конструкции:

- бак накопительный объемом 20 м³, расположенный ниже уровня пола;
- два СИ объемного расхода (электромагнитные расходомеры Promag 50/53 H: 1) DN40; 2) DN100);
- система создания и поддержания расхода воды, включая насос Wilo IL20/350–37/4;
- два успокоительных бака с поперечными перегородками;
- измерительная линия (лоток длиной 6 м с поперечным сечением DN600 и тремя смотровыми окнами);
- сборный бак;
- указатель уровня воды;
- трубозапорная арматура;
- система управления, сбора и обработки данных (силовой шкаф, персональный компьютер с программным обеспечением, контроллер).

⁶ «Аршин» здесь и далее – Федеральная государственная информационная система «Аршин» Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФГИС «Аршин» ФИФ ОЕИ).

Принцип работы:

→ вода из бака накопительного насосами забирается и подается по напорному трубопроводу через блок эталонных расходомеров в успокоительные баки → из второго успокоительного бака вода истекает в измерительную линию – лоток с установленными в нем измерителями давления, температуры и поверяемыми СИ → при выходе из лотка вода сливается в сборный бак → из сборного бака отправляется обратно в бак накопительный.

Конструктивные особенности:

- измерительный стол имеет возможность изменять угол относительно горизонта;
- система управления, сбора и обработки данных в автоматическом режиме сравнивает полученные показания поверяемого и электромагнитного (эталонного) СИ;
- контроллер в автоматическом режиме управляет исполнительными механизмами установки, собирает и обрабатывает информацию от измерителей давления и температуры, поверяемых и эталонных СИ.

Предложения для доработки установки, сформулированные на основе опыта эксплуатации:

- увеличение длины лотка;
- монтаж успокоителей потока на входе в лоток;
- монтаж СИ уровня воды в точке установки поверяемого СИ;
- внесение меток в поток, имитирующих неоднородности в потоке воды.

Развитие науки и техники, внедрение инновационных технических решений, повышение эффективности производства и производительности труда позволило изготовителям из Российской Федерации представить потребителям СИ с пределами допускаемой относительной погрешности, равными $\pm 5\%$ [1–5]. «Аршин» содержит информацию более чем о 60 типах СИ жидкости в безнапорных трубопроводах:

- с различными подходами к определению погрешности измерений расхода и количества жидкости;
- с различными подходами к определению МПИ.



Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Внешний вид установки поверочной УПР СВ 600

Fig. 1. Appearance of the UPR SV 600 calibration rig

Такое разнообразие СИ способствует развитию и совершенствованию эталонной базы [6, 7].

Состав макета эталона

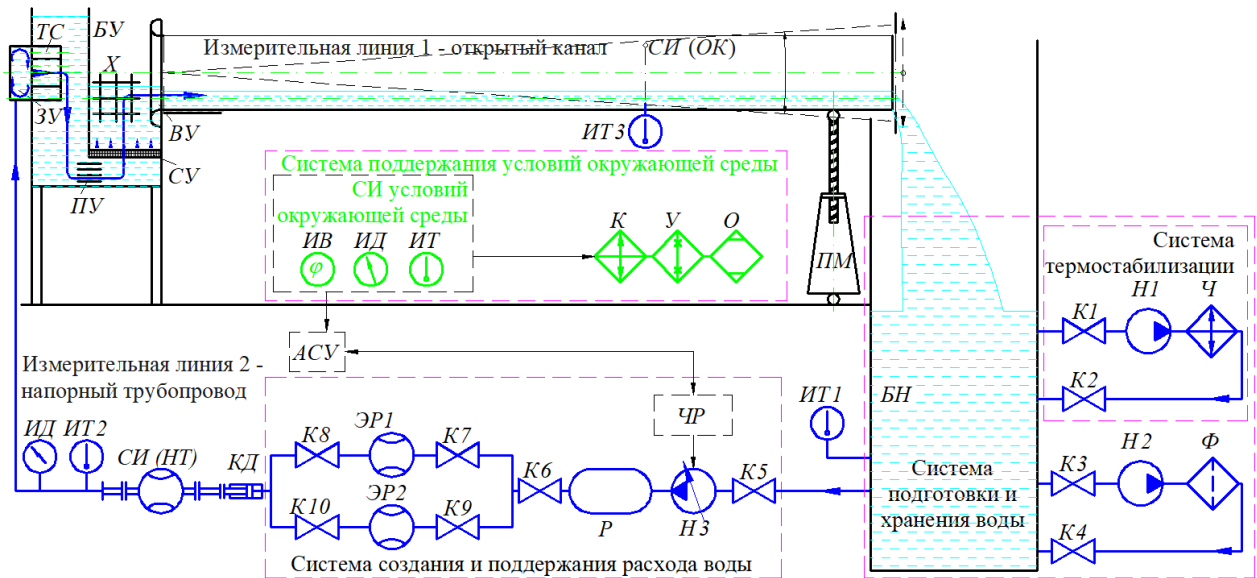
Исследованы технические решения в конструкции основных систем макета эталона, полученные на основе анализа отечественной литературы, информационных поисковых и библиографических баз данных.

В результате сформирован состав макета эталона (рис. 2):

- система подготовки и хранения воды;
- система поддержания температуры (термостабилизации) воды;
- система создания и поддержания расхода воды;
- система поддержания условий окружающей среды (воздуха);

- СИ объемного расхода воды;
- СИ температуры, атмосферного давления и влажности воздуха;
- СИ температуры воды;
- трубопроводная обвязка и запорно-регулирующая арматура с электроприводами;
- измерительная линия № 1 (открытый канал) и измерительная линия № 2 (напорный трубопровод) для установки исследуемых, испытываемых, поверяемых, калибруемых СИ;
- автоматизированная система управления технологическим процессом, измерительной линией № 1 (открытым каналом) и измерительной линией № 2 (напорным трубопроводом).

Водяной контур макета установки условно замкнут (рис. 2а), т. е. вода забирается насосом *НЗ* из бака накопительного *БН*, по напорному трубопроводу *НТ* через гаситель пульсаций (ресивер) *Р*, бак-успокоитель *БУ* попадает



а

Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data



б

Рисунок подготовлен авторами по собственным данным / The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 2. Макет эталона: а – принципиальная схема; б – внешний вид

Fig. 2. Prototype standard: a – schematic diagram; б – appearance

в открытый канал ОК и возвращается обратно в бак накопительный БН.

Последовательно рассмотрим каждый элемент конструкции макета.

Система подготовки и хранения воды имеет в составе бак накопительный БН, фильтр Ф для очистки воды. Фильтрация обеспечивает поддержание постоянства физико-химических

свойств воды. Необходимый объем бака накопительного позволяет создать минимально допустимый гидрометрический напор воды над входными патрубками насоса *НЗ*, гарантируя им бесперебойную работу.

Система создания и поддержания температуры воды включает в свой состав чиллер (охладитель) *Ч* и циркуляционный насос *НЦ*, который обеспечивает забор воды из бака накопительного *БН*, охлаждение ее в чиллере *Ч* и возвращает воду в бак накопительный *БН*. Циркуляция воды позволяет добиться равномерного распределения градиента температур в баке накопительном *БН*.

Система создания и поддержания расхода воды включает в свой состав насос *НЗ* с частотным регулятором *ЧР*, ресивер *Р* и трубозапорную арматуру *К5* и *К6*, обеспечивает

стабильность поддержания заданного значения объемного расхода воды через измерительную линию (открытый канал).

Система создания и поддержания условий окружающей среды включает в свой состав кондиционер *К*, увлажнитель *У* и осушитель *О*. Данная система обеспечит поддержание температуры и относительной влажности окружающего воздуха в помещении эталонной установки в требуемых диапазонах.

Электромагнитные расходомеры ЭР1 и ЭР2 необходимы для контроля выхода установки на заданное значение объемного расхода и его поддержания в процессе эксплуатации макета эталона. Кроме этого, данные электромагнитные расходомеры *ЭР1* и *ЭР2* используются в качестве эталонных расходомеров при передаче единиц объемного расхода воды как

Таблица 1. Технические и метрологические характеристики макета эталона

Table 1. Technical and metrological characteristics of the prototype standard

Наименование характеристики	Значение
Ширина измерительной линии 1 (открытого канала), м	0,25
Длина измерительной линии 1 (открытого канала), м	10
Номинальный диаметр напорного трубопровода 1 (измерительная линия № 2), DN	32
Номинальный диаметр напорного трубопровода 2 (измерительная линия № 2), DN	80
Диапазон воспроизводимого объемного расхода сточных вод, м ³ /ч	от 1 до 100
Расширенная неопределенность измерений при воспроизведении единицы объемного расхода сточных вод для уровня доверия $P=0,95,\%$	0,25
Измеряемая среда	вода питьевая
Диапазон температуры измеряемой среды, °C	от 15 до 25

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

Таблица 2. Условия эксплуатации

Table 2. Operating conditions

Наименование характеристики	Значение
Диапазон температуры окружающего воздуха, °C	от 15 до 25
Диапазон измерений атмосферного давления, кПа	от 87 до 106
Диапазон относительной влажности окружающего воздуха, %	от 30 до 80

Таблица составлена авторами по собственным данным / The table is prepared by the authors using their own data

СИ (ОК), установленным в открытом канале, так и *СИ (НТ)*, установленным в напорный трубопровод.

Средства измерений температуры ИТ1... ИТ3 позволяют определять значения температуры воды в баке накопительном *БН*, напорном трубопроводе *НТ* и в измерительной линии (открытом канале) в режиме реального времени, в том числе для определения теплофизических свойств воды.

Средства измерений условий окружающей среды (средства измерений температуры *ИТ*, атмосферного давления *ИД* и относительной влажности окружающей среды *ИВ*) позволяют контролировать постоянство заданных условий по окружающему воздуху (табл. 2) в помещении лаборатории и рассчитывать термодинамические свойства окружающего воздуха.

Измерительная линия № 1 (открытый канал) и *измерительная линия № 2* (напорный трубопровод) (рис. 2а) дают возможность поверки (калибровки) безнапорных и напорных *СИ*. Для каждой измерительной линии предусмотрено место установки поверяемых (калибруемых) *СИ* (*ОК* и *НТ* соответственно). Габариты сменных лотков для измерительной линии № 1 и сменных участков напорных трубопроводов измерительной линии № 2 обеспечивают требуемые относительные длины прямолинейных участков в открытом канале $L/D_{э\text{кв}}$ и напорном трубопроводе L/D .

Подъемный механизм *ПМ* (рис. 2а) измерительной линии № 1 (открытого канала) регулирует угол ее наклона относительно горизонта для имитации течения потока воды в реальном водном канале.

Автоматизированная система управления технологическим процессом АСУ (рис. 3а) обеспечивает управление, унифицирует технологические процессы, осуществляет мониторинг, обработку и запись основных режимных параметров потока воды (температуры, давления и объемного расхода воды) в напорном трубопроводе, измерительных линиях №№ 1 и 2. Трубозапорная и регулирующая арматура, расположенная в напорном трубопроводе, измерительной линии № 2 и на выходе из измерительного стола 1, осуществляет регулирование уровня потока воды в открытом канале. Контроль стабильности расхода воды

в измерительной линии осуществляется системой ПИД-регулирования по показаниям электромагнитных расходомеров *ЭР1* и *ЭР2*, показаниям вторичных преобразователей температуры и давления воды при варьировании частоты вращения электропривода *ЧР* водяного насоса *НЗ* в напорном трубопроводе.

Трубопроводная обвязка и запорно-регулирующая арматура с электроприводами (запорная арматура *КЗ ... К10* (рис. 2а)) позволяет обеспечить распределительную, регулирующую, предохранительную функции при заполнении водой трубопроводной системы, монтаждемонтаж электромагнитных расходомеров *ЭР1* и *ЭР2* и калибруемых (поверяемых) *СИ* в измерительной линии № 2, и сформировать небурный безнапорный поток воды в открытом канале измерительной линии № 1.

Результаты и обсуждение

Оценка гидродинамических характеристик

Обратимся к гидродинамическим характеристикам потока воды в открытом канале. Помимо обеспечения заданных режимных и метрологических характеристик эталона важными с точки зрения его эксплуатации и технического обслуживания являются массогабаритные и технико-экономические характеристики. С одной стороны, чем компактнее эталон, тем меньше требуется площадь помещения для его размещения и, соответственно, меньше затрат у его владельца. С другой стороны, существуют рекомендации по обеспечению заданных гидродинамических характеристик потока воды в открытых каналах, которые указывают на соблюдение минимальных относительных длин прямолинейных участков в открытом канале $L/D_{э\text{кв}}$.

В литературных источниках изложены рекомендации и конструкторские подходы к формированию развитого турбулентного профиля скорости при вынужденном течении потока воды в напорных каналах. Однако данные рекомендации и технические подходы не позволяют получить близкий к равномерному профиль скорости потока воды при его течении в открытом канале. Отчасти это обусловлено отсутствием успокоителей потока воды в конструкции бака-успокоителя и профилированно-го устройства на входе в открытый канал, что

приводит к возникновению в баке-успокоителе флуктуаций потока воды и резкое его перестроение при истечении в открытый канал. Появляются активные (волновые) колебания с возникновением продольных вихрей на свободной поверхности воды. Колебания поверхности и продольные вихри не затухают на значительных расстояниях от входа в открытый канал, вызывая искажение профиля скорости потока воды даже при его значительных относительных длинах $L/D_{\text{экв.}} \geq 100$.

Поэтому важным аспектом при проектировании макета эталона являлось обеспечение в открытом канале небурного изотермического потока воды ($Fr \leq 1$ при $Re = 2 \cdot 10^5$) [8]. Небурный изотермический поток воды в лотке характеризуется площадью живого сечения ω и смоченным периметром χ . Важными режимными характеристиками являются средняя расходная скорость w и объемный расход воды Q_v . Характерным признаком плоского живого сечения ω открытого канала является формирование такого профиля скорости, в котором локальные значения скорости w_i воды во всех точках живого сечения мало (на 5–10 %) отличаются от средней расходной скорости w .

Реализация в открытом канале макета эталона небурного потока воды с близким к двумерному профилем скорости обеспечивается оригинальными техническими решениями. Напорный поток воды тангенциально подводится к цилиндрической камере закручивающего устройства ЗУ, закрепленной на боковой стенке бака-успокоителя БУ (рис. 2). Пассивная закрутка потока в цилиндрической камере приводит к увеличению вращательной составляющей скорости. Благодаря этому увеличению и увеличению осевой скорости в пристеночной области увеличивается градиент скорости около поверхности. Увеличивается неоднородность скоростных полей, заметной становится радиальная составляющая скорости. Дополнительная энергия затрачивается на образование замкнутых циркуляционных течений в приосевой области, а также создание вихрей Тейлора – Гертлера около стенки [9]. Возрастает и энергия турбулентных пульсаций.

Сложный характер воздействия пассивной закрутки потока на потери энергии при тангенциальном входе позволяет снизить уровень

общих возмущений потока (представим схематически ниже).

→ На выходе из закручивающего устройства ЗУ установлен трубчатый струевыпрямитель ТС, который устраняет вихреобразование в потоке воды и выравнивает профиль скорости потока воды при входе в первую секцию ($h_y \times b_y \times l_y = 1 \times 0,6 \times 0,38$ м) бака-успокоителя БУ. Перегородка, разделяющая бак-успокоитель на две секции, расположена на высоте от дна 0,19 м.



Далее поток воды опускается на дно первой секции и проходит через поперечное сечение ($h_p \times b_y = 0,19 \times 0,6$ м) с ребрами продольного успокоителя ПУ. Ребра высотой $h_p = 0,19$ м расположены по оси течения потока воды параллельно друг другу в плотной упаковке с относительным шагом

$$t_p/b_y = 0,03,$$

где $t_p = 0,02$ м – продольный шаг между ребрами; b – ширина бака-успокоителя, что позволяет минимизировать флуктуации потока воды на входе во вторую секцию ($h_y \times b_y \times l_y = 1 \times 0,6 \times 0,47$ м) бака-успокоителя.



Поток воды во второй секции бака-успокоителя поднимается вверх через сечение $b_y \times l_y = 0,6 \times 0,47$ м, так что средняя расходная скорость потока воды в данном сечении при максимальном значении объемного расхода не превышает $w < 0,1$ м/с.



Далее восходящий поток воды проходит через многослойный сеточный успокоитель.



Окончательное формирование потока воды происходит в сотовом хонейкомбе Х, который расположен перед входным устройством ВУ открытого канала.

Технические решения по минимизации флуктуаций потока в баке-успокоителе в комплексе позволили сформировать на входе в открытый канал небурный поток воды с минимальным уровнем колебаний свободной поверхности.

Локальные значения скорости потока воды w_i (рис. 3) определялись с использованием батареи из семи трубок Пито. Трубки Пито устанавливались в плоскости поперечного сечения

открытого канала на заданном расстоянии друг от друга по относительной координате y_i/B в диапазоне от 0,04 до 0,8 (где y_i – координата расположения i -й трубки, м; B – ширина открытого канала, м). Батарея трубок Пито располагалась поочередно в шести поперечных сечениях открытого канала с относительной длиной $L/D_{\text{экв.}}$ от 3 до 100. Батарея трубок Пито перемещалась в поперечном сечении открытого канала по координате x_i с шагом 0,01 м от минимального значения $x_1 = 0,0015$ м

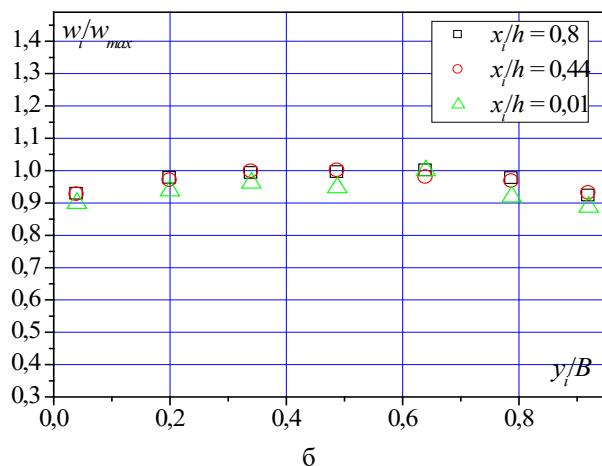
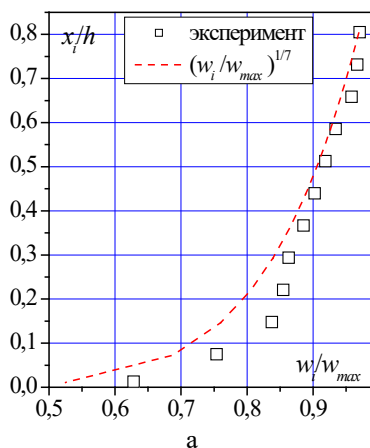


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 3. Распределение локальных значений относительных скоростей w_i/w_{max} потока воды в открытом канале в поперечном сечении открытого канала при $L/D_{\text{экв.}} = 100$ при $Q_V = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$: а – в срединном продольном сечении y_4/B ; б – в поперечном сечении

Fig. 3. Distribution of local relative flow velocity values w_i/w_{max} in an open channel at a cross-section of the open channel at $L/D_{\text{eq}} = 100$ and $Q_V = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$: а – in the median longitudinal section y_4/B ; б – in the transverse cross-section

до максимального значения $x_{\text{max}} = h$ (где h – глубина потока воды в исследуемом сечении).

Результаты экспериментальных исследований локальных значений скорости потока воды в поперечном сечении $L/D_{\text{экв.}} = 100$ открытого канала при максимальном значении объемного расхода воды $Q_V = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ наглядно иллюстрируют развитый турбулентный профиль скорости потока воды (рис. 3а), который удовлетворительно описывается классическим степенным законом распределения $x_i/h = (w_i/w_{\text{max}})^{1/7}$. Доказано, что практически в каждой точке поперечного сечения локальные значения скорости w_i потока воды примерно равны значению средней расходной скорости w потока воды. Получено экспериментальное подтверждение (рис. 3б), что распределение локальных значений в поперечном сечении относительной скорости w_i/w_{max} потока воды в рассматриваемом сечении $L/D_{\text{экв.}} = 100$ очень близко к двумерному потоку воды.

Таким образом, реализованные оригинальные технические решения по минимизации флуктуаций потока в баке-успокоителе, установкой хоникомба и профилированного входного устройства обеспечили оптимальные гидродинамические характеристики потока воды в исследованном сечении $L/D_{\text{экв.}} = 100$ для установки поверяемого (калибруемого) СИ.

Оценка тепловых потоков

Обратимся к оценке тепловых потоков к потоку воды (параметры термостабилизации воды). Насос создает вынужденное течение потока воды в напорном трубопроводе и открытом канале. При работе электродвигателей и насосов часть потребляемой электрической энергии расходуется на нагрев воды. Таким образом, температура потока воды в баке накопительном возрастает при его непрерывной циркуляции в контуре макета эталона. Задача поддержания температуры воды в баке накопительном и водяном контуре в заданном диапазоне температур (табл. 1) имеет непосредственное отношение к метрологическим и режимным характеристикам макета эталона. Для решения данной задачи необходимо было разработать и апробировать на практике инженерную методику расчетов:

– тепловых притоков к водяному контуру макета эталона;

– энергетических потерь, связанных с нагревом воды в баке накопительном, при максимальном значении объемного расхода воды до 100 м³/ч.

Кроме того, методика должна была учитывать утечки теплоты в окружающую среду от нагретых поверхностей основных систем макета эталона. Апробация итоговых расчетов по инженерной методике выполнялась по результатам экспериментальных исследований при создании вынужденного течения потока воды в открытом канале макета эталона при значении объемного расхода воды до 100 м³/ч.

При работе электродвигателя и насоса возникают потери, на покрытие которых расходуется часть потребляемой ими электрической энергии. Потери в электродвигателе возникают в активном сопротивлении обмоток, в материале (стали) при изменении магнитного потока в магнитопроводе. Возникают механические потери на трение в подшипниках и трение о воздух его вращающихся частей.

Работа насоса заключается в том, что он преобразует механическую энергию электродвигателя в энергию воды, т. е. сообщает протекающему через него потоку воды мощность. Запас энергии, приобретенный водой в насосе, позволяет потоку преодолевать гидравлическое сопротивление и подниматься на геометрическую высоту. Энергия, которую приобретает в насосе каждая единица веса воды, т. е. прирост удельной энергии, имеет линейную размерность и представляет собой напор, создаваемый насосом:

$$H_n = \left(\frac{p_2}{\gamma} + a_2 \frac{w_{n2}^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_1}{\gamma} + a_1 \frac{w_{n1}^2}{2g} \right), \quad (1)$$

где p_1 и p_2 – давление на входе и выходе из насоса, Па; $\gamma = \rho \cdot g$ – удельный вес, Н/м³; w_{n1} и w_{n2} – средние скорости потока воды на входе и выходе из насоса; a_1 и a_2 – коэффициенты кинетической энергии на входе и выходе из насоса; g – ускорение свободного падения, м/с².

Таким образом, создаваемый насосом напор H_n складывается из прироста пьезометрической высоты (статического напора) и прироста удельной кинетической энергии (динамического напора). Однако второй член в (1) меньше первого, а при одинаковых диаметрах

патрубков на входе и выходе ($d_1 = d_2$, следовательно $w_1 = w_2$) и при $a_1 = a_2$ равен нулю, и тогда:

$$H_n = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{p_n}{\gamma}. \quad (2)$$

Объемный расход воды $Q_v = 100$ м³/ч = 0,028 м³/с, подаваемой через систему напорных трубопроводов и лоток, является полезной работой насоса. Полезной мощностью насоса или мощностью, развиваемой насосом, является энергия, которую сообщает насос всему потоку жидкости ежесекундно, Вт:

$$N = Q_v \cdot \gamma \cdot H_n, \quad (3)$$

где Q_v – объемный расход, м³/с; $\gamma = \rho \cdot g$ – удельный вес, Н/м³; H_n – напор, м; p_n – избыточное давление, Па.

Отношение развиваемой мощности N к потребляемой N_0 является коэффициентом полезного действия насоса:

$$\eta = \frac{N}{N_0}. \quad (4)$$

Полный коэффициент полезного действия учитывает следующие потери энергии в насосе:

- гидравлические потери, т. е. потери напора на трение и вихреобразование;
- объемные потери, обусловленные циркуляцией жидкости через зазоры в насосе;
- механические потери, т. е. потери на механическое трение в подшипниках, уплотнениях;
- тепловые потери на нагрев воды и тепловую энергию, рассеивающуюся в окружающей среде.

Тепловые потери (притоки), обусловленные нагревом воды из-за взаимодействия воды с рабочими элементами (лопатками), приводят к повышению ее температуры в баке накопительном. Согласно условиям эксплуатации установки (табл. 1), температура воды в баке накопительном должна поддерживаться в диапазоне от 15 до 25 °С в течении всей рабочей смены. Макет эталона работает в диапазоне объемного расхода от 1 до 100 м³/ч (от $2,28 \cdot 10^{-4}$ до 0,028 м³/с). Исходя из заданных технических характеристик осуществляется расчет тепловой мощности N_t . Мощность N_t отбирается от насоса и испускается в окружающую среду (в воду

в напорном трубопроводе и открытом канале, в окружающий воздух), в том числе при взаимодействии лопаток рабочего колеса насоса с водой. При этом происходит нагрев воды в баке накопительном за счет замкнутого цикла оборота воды в исходном эталоне. Тепловая мощность N_t , затрачиваемая на нагрев окружающей среды, определяется в кВт как [10]

$$N_t = N \cdot (1 - \eta) = 5 \cdot (1 - 0,75) = 1,5. \quad (5)$$

Максимальное значение утечек тепла в окружающий воздух (при максимальном градиенте температур $t_w - t_f = 25 - 15 = 10^\circ\text{C}$), в том числе от нагретых поверхностей бака накопительного, стенок лотка, напорных и соединительных трубопроводов, оценивается в кВт как [11]

$$Q_{т.п.} = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F_{п.} / 1000 = 3,34 \cdot (25 - 15) \cdot 12,38 / 1000 \approx 0,41, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²/°C); t_w – средняя температура нагретых поверхностей, °C; t_f – средняя температура окружающего воздуха вне зоны, охваченной процессом теплообмена, °C; $F_{п.}$ – площадь теплоотдающих поверхностей, м².

Коэффициент теплоотдачи α определяется из критериального уравнения М. А. Михеева (8) [11], Вт/(м²/°C):

$$\alpha = \frac{Nu_m \cdot \lambda_{воз}}{l} = \frac{166,51 \cdot 0,0251}{1,25} = 3,34, \quad (7)$$

$$Nu_m = c \cdot Ra_m^n = c \cdot (Gr \cdot Pr)_m^n = 0,135 \cdot (2,64 \cdot 10^9 \cdot 0,71)^{1/3} = 166,51, \quad (8)$$

где Nu_m , Ra_m , $Gr_m = (g \cdot d^3 / \nu^2) \cdot \beta \cdot \Delta t$ и $Pr_m = \nu / a$ – критерии Нуссельта, Рэлея, Грасгофа и Прандтля соответственно; c и n – эмпирические коэффициенты; m – индекс, указывает на то, что в качестве определяющей температуры (по которой выбираются значения физических параметров воздуха) принимается среднеарифметическая температура $t_m = (t_w + t_f) / 2$, где t_w – средняя температура нагреваемой поверхности; t_f – температура окружающего воздуха вне зоны, охваченной процессом теплообмена; g – ускорение силы тяжести, м/с²;

$\lambda_{воз}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · К); ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; β – коэффициент объемного расширения, 1/К. Значения c и n в уравнении (6) зависят от критерия Ra_m .

Потери мощности на насосе $\Delta N_t = N_t - Q_{т.п.}$, расходуемой на нагрев воды в напорном трубопроводе, открытом канале и накопительном баке, с вычетом утечек тепла в окружающую среду достигают 0,83 кВт. Общая масса воды в баке накопительном, напорном трубопроводе и лотке составляет ≈ 1900 кг, значение изобарной массовой теплоемкости воды $c_p \approx 4180,1$ Дж/(кг · °C). Исходя из того можно оценить время непрерывной работы макета эталона при значении объемного расхода $Q_V = 100$ м³/ч = 0,028 м³/с, за которое температура воды поднимется от минимального значения $t_{min} = 20^\circ\text{C}$ до $t_{max} = 25^\circ\text{C}$, ч:

$$\tau = c_p \cdot M_{бк} \cdot (t_{max} - t_{min}) / \Delta N_t / 3600 \approx 7,4. \quad (9)$$

Таким образом, длительность работы установки при максимальном значении объемного расхода воды $Q_V = 100$ м³/ч = 0,028 м³/с без системы охлаждения достигает $\tau \approx 7,4$ часа. В течение данного времени τ температура воды в водяном контуре макета эталона не превысит 25°C .

Апробация (рис. 5) инженерной методики расчета тепловых притоков по (1–9) к водяному контуру макета эталона выполнена при значении объемного расхода воды $Q_V = 96$ м³/ч и температуре окружающего воздуха в лаборатории $t_{воз} = 20,9^\circ\text{C}$.

Графическая зависимость изменения температуры воды $\Delta t = (t_2 - t_1) = 5^\circ\text{C}$ за интервал времени $\tau = 8$ часов (рис. 4) в баке накопительном вида $t = f(\tau)$ наглядно иллюстрирует увеличение температуры воды в баке накопительном до предельного значения температуры воды $t_{max} = 25^\circ\text{C}$. Экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетным значением, определенным по инженерной методике.

Далее были выполнены эксперименты по оценке интервала времени охлаждения нагретой воды в баке накопительном после выключения установки. Нагретая в баке накопительном вода с температурой $t_{max} = 25^\circ\text{C}$

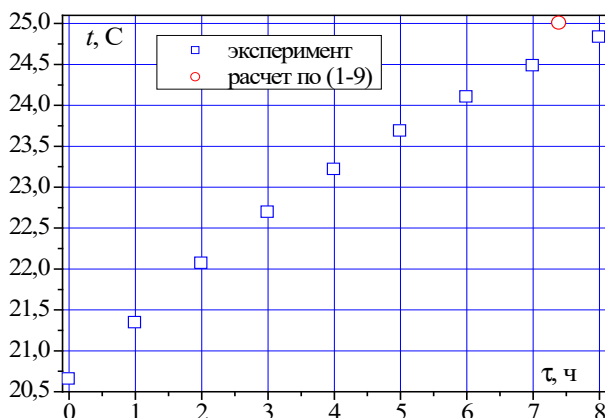


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 4. Графическая зависимость изменения температуры воды от времени

Fig. 4. Graphical dependence of water temperature change on time

охлаждалась при температуре окружающего воздуха $t_{\text{воз}} = 21,7^\circ\text{C}$ в условиях свободной конвекции. Результаты исследований показали, что за интервал времени $\tau_{\text{охл}} = 15$ часов вода охлаждалась только до температуры $t = 23,3^\circ\text{C}$, а за интервал времени $\tau_{\text{охл}} = 39$ часов – до температуры $t = 22,1^\circ\text{C}$. Охладить воду в баке накопительном до исходного минимального значения температуры воды $t_{\text{мин}} = 20^\circ\text{C}$ невозможно без системы поддержания температуры (термостабилизации) воды за интервал времени $\tau_{\text{охл}} = 15$ часов между рабочими сменами. Термостабилизация воды в баке накопительном в широком диапазоне изменения внешних условий окружающей среды обеспечивается системой охлаждения на основе промышленно выпускаемых холодильных установок – чиллеров. Планируемая мощность системы создания и поддержания температуры измеряемой среды согласно выполненным расчетам по (1–9) – не менее 1,25 кВт.

Заклучение

Апробированы перспективные технические решения в основных системах макета эталона. Реализовано небурное течение потока в открытом канале (лотке). Обеспечены заданные метрологические характеристики в заявленном диапазоне объемного расхода Q_V от 1 до $100\text{ м}^3/\text{ч}$.

Реализация пассивной закрутки напорного потока воды в цилиндрической камере

с трубчатым струевыпрямителем на выходе из нее позволила снизить уровень общих возмущений потока на входе в первую секцию бака-успокоителя.

Выполнить окончательное формирование потока воды в открытом канале с близким к двумерному профилю скорости в его поперечном сечении позволили оригинальные конструкции последовательно установленных успокоителей в составе:

- продольных плотноупакованных ребер;
- многослойных сеток;
- сотового хонейкомба;
- профилированного входного устройства.

Получено экспериментальное подтверждение формирования небурного потока в поперечном сечении $L/D_{\text{экв}} = 100$ открытого канала (лотка) с близким к двумерному профилю скорости потока воды, который удовлетворительно описывается классическим степенным законом распределения $x_i/h = (w_i/w_{\text{max}})^{1/7}$.

Доказано, что в каждой точке поперечного сечения локальные значения скорости w_i потока воды примерно равны значению средней расходной скорости w потока воды. Таким образом, реализованные оригинальные технические решения по минимизации флуктуаций потока обеспечили оптимальные гидродинамические характеристики потока воды в исследованном поперечном сечении $L/D_{\text{экв}} = 100$ для установки поверяемого (калибруемого) СИ.

Разработана инженерная методика для определения тепловых притоков к воде (параметров для термостабилизации воды) в контуре макета эталона для формирования требований по мощности к системе охлаждения на основе промышленно выпускаемых холодильных установок – чиллеров.

Промежуточные результаты первого этапа создания национального эталона будут использованы при проектировании исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод.

Вклад авторов: Щелчков А. В. – концептуализация, методология, проведение исследований, создание рукописи и ее редактирование, верификация данных, создание черновика рукописи, визуализация; Миннуллин Р. Р. – проведение исследований, формальный анализ, визуализация; Корнеев Р. А. – администрирование

данных; Горчев А. И. – руководство исследованием; Корнеев А. А. – программирование; Щелчкова М. А. – проведение исследований, визуализация.

Contributions of the authors: Shchelchikov A. V. – conceptualization, methodology, research, manuscript creation and editing, data verification, draft creation, visualization; Minnullin R. R. – research, formal analysis, visualization; Korneev R. A. – data curation; Gorchev A. I. – supervision; Korneev A. A. – programming; Shchelchkova M. A. – research, visualization.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Conflict of interest: The authors declare no actual or potential conflicts of interest.

Финансирование: Создание макета исходного эталона и результаты экспериментальных исследований выполнены в рамках государственного контракта № 24411.4732190019.12.001 от 04.10.2024 на выполнение опытно-конструкторской работы «Разработка исходного эталона единицы объемного расхода сточных вод» (шифр «Куб»).

Funding: The creation of a prototype of the initial standard and the results of experimental studies were carried out within the framework of state contract № 24411.4732190019.12.001 dated 04.10.2024 for the implementation of experimental design work «Development of an initial standard for measuring the volumetric flow rate of wastewater» (code «Cube»).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Матюгин М. А., Мильцын Д. А. Современные приборы и методы измерения расхода воды в открытых водотоках // Научные проблемы водного транспорта. 2015. № 44. С. 66–76.
2. Костенко И. Г., Мартюгин В. А., Вязьмин Ю. А. Измерение параметров безнапорных потоков сточных вод: приборный парк // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2019. № 5. С. 21–29.
3. Васильченко А. П., Кореновский А. М. Ультразвуковые методы и приборы для измерения расхода воды на гидромелиоративных системах // Экология и водное хозяйство. 2020. № 4 (7). С. 135–149. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-4-135-149>
4. Садчикова Г. М., Мамолина А. П. Особенности измерения расхода жидкостей в открытых каналах // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации : Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 22–23 марта 2012 года / Ответственный редактор: Горохов А. А. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2012. С. 191–193.
5. Учет безнапорных сточных вод // Сантехника. Водоснабжение и инженерные системы. 2020. № 3. С. 40–43. Режим доступа: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7566 (дата обращения: 06.05.2025).
6. Тухватуллин А. Р. ГЭТ 63–2019: новаторский метод стабилизации расхода жидкости в эталонной установке 3 // Эталоны. Стандартные образцы. 2023;19(5):71–82. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-71-82>
7. Корнеев Р. А. Совершенствование государственной поверочной схемы для средств измерений расхода и количества жидкости // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 3. С. 7–20. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-7-20>
8. Liu Y., Stoesser T., Fang H. W. Impact of turbulence and secondary flow on the water surface in partially filled pipes // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. P. 035123. <https://doi.org/10.1063/5.0078564>
9. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М. : Машиностроение, 1982. 200 с.
10. Коваль А. А., Абоаджи Д. М. Инструменты и оборудование нефтегазового машиностроения и их применение // Молодой ученый. 2023. № 20 (467). С. 37–41.
11. Интенсификация отрывного течения и теплообмена в канавке типа бумеранг на стенке канала / С. А. Исаев [и др.] // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2025. № 1. С. 75–112. <https://doi.org/10.31857/S1024708425010045>

REFERENCES

1. Matyugin M. A., Miltyn D. A. The modern devices and methods of measurement of water discharge in open waterways. *Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport*. 2025;1:75–112. (In Russ.).
2. Kostenko I. G., Martyugin V. A., Vyazmin Yu. A. Measurement of parameters of unpressurized wastewater streams: instrument park. *Nailuchshie Dostupny'e Tekhnologii Vodostabzheniya i Vodootvedeniya*. 2019;5:21–29. (In Russ.).

3. Vasilchenko A. P., Korenovskiy A. M. Ultrasonic methods and instruments for measuring water flow in hydoreclamation systems. *Ecology and Water Management*. 2020;4(7):135–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-4-135-149>
4. Sadchikova G. M., Mamolina A. P. Features of measuring the flow rate of liquids in open channels. In: Gorokhov A. A., ed. *Modern Instrumental Systems, Information Technologies and Innovations: Proceedings of the IX International scientific and practical conference*. Kursk: South-West State University; 2012. P. 191–193. (In Russ.).
5. Metering of gravity flow wastewater. *Santexnika. Vodosnabzhenie i Inzhenerny'e Sistemy'*. 2020;3:40–43. (In Russ.). Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7566 (Accessed: 06.05.2025).
6. Tukhvatullin A. R. GET 63–2019: innovative method for stabilizing liquid flow rate in a reference installation 3. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(5):71–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-71-82>
7. Korneev R. A. Improvement of the state verification schedule for flow and quantity measuring instruments. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(3):7–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-7-20>
8. Liu Y., Stoesser T., Fang H. W. Impact of turbulence and secondary flow on the water surface in partially filled pipes. *Physics of Fluids*. 2022;34:035123. <https://doi.org/10.1063/5.0078564>
9. Shchukin V. K., Khalatov A. A. Heat exchange, mass transfer, hydrodynamics of swirling flows in axisymmetric channels. Moscow: Mashinostroyeniye; 1982. 200 p. (In Russ.).
10. Koval A. A., Aboadzi D. M. Tools and equipment of oil and gas engineering and their application. *Molodoy ucheny'y*. 2023;20(467):37–41. (In Russ.).
11. Isaev S. A., Popov I. A., Nikushchenko D. V., Sudakov A. G., Klyus A. A., Mironov A. A. Enhancement of separation flow and heat transfer in a boomerang-type groove on the channel wall. *A Journal of Russian Academy of Sciences. Fluid Dynamics*. 2025;1:75–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1024708425010045>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щелчков Алексей Валентинович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой теплотехники и энергетического машиностроения, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
e-mail: AVSchelchkov@kai.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6706-0679>

Миннуллин Руслан Рансович – заместитель начальника НИО-1, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а
e-mail: rous.06@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3246-1237>

Корнеев Роман Александрович – начальник НИО-1, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а
e-mail: rak_1985@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-2078-6850>

Горчев Александр Иванович – канд. техн. наук, заместитель директора филиала по науке, ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
420088, г. Казань, ул. 2-я Азинская, 7а
e-mail: a.i.gorchev@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Shchelchkov – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russia
e-mail: AVSchelchkov@kai.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6706-0679>

Ruslan R. Minnullin – Deputy Head of the Research Department № 1, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
7a 2nd Azinskaya St., Kazan, 420088, Russia
e-mail: rous.06@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0001-3246-1237>

Roman A. Korneev – Head of the Research Department No. 1, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
7a 2nd Azinskaya St., Kazan, 420088, Russia
e-mail: rak_1985@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0005-2078-6850>

Aleksandr I. Gorchev – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Branch for Science, the Research Department № 1, VNIIR – Affiliated Branch of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
7a 2nd Azinskaya St., Kazan, 420088, Russia
e-mail: a.i.gorchev@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0927-8776>

Корнеев Андрей Александрович – технический директор ООО «АКТЕК»
197342, г. Санкт-Петербург, ул. Сердобольская, д. 64, корп. 1, лит. А, офис 627
e-mail: yak02@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-6487-9315>

Andrey A. Korneev – Technical Director of the Limited Liability Company «AKTEK»
64, lit. A, bldg. 1, office 627, Serdobolskaya St., St. Petersburg, 197342, Russia
e-mail: yak02@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-6487-9315>

Щелчкова Марина Алексеевна – студент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
e-mail: SchelchkovaMA@styd.kai.ru

Marina A. Shchelchkova – Student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI
10 K. Marx St., Kazan, 420111, Russia
e-mail: SchelchkovaMA@styd.kai.ru