

Государственный первичный специальный эталон единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости ГЭТ 63-2019

Альберт Рашидович Тухватуллин¹, Алексей Валентинович Щелчков²✉, Виктор Андреевич Фафурин³

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Казань, Республика Татарстан, Россия

² Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Республика Татарстан, Россия

³ Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Республика Татарстан, Россия, fafurin.viktor@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3814-2544>

¹vniiir-etalon@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7250-3246>

²avschelchkov@kai.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-67060679>

Аннотация. Изложены аспекты совершенствования метрологического обеспечения измерений единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости в Российской Федерации. Рассмотрены принципиально новые конструктивные решения ключевых модулей эталонной установки ЭУ-3 Государственного первичного специального эталона единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости ГЭТ 63-2019. Конструктивные решения базируются на результатах численного и физического моделирования процессов гидродинамики при вынужденном течении рабочей среды (воды) в трубопроводах с различной геометрией проточной части. Обоснованы принципы действия модулей стабилизации и регулирования расхода воды. Представлены новаторские решения по конструкции чувствительных элементов переключателя потока, принципу построения временной диаграммы и определению интервала времени измерений. Представлены метрологические характеристики ГЭТ 63-2019.

Ключевые слова: эталонная установка, бюджет неопределённости, метрологические характеристики, свободная поверхность воды, радиусное сопло, равномерный профиль скорости.

Для цитирования: Тухватуллин А. Р., Щелчков А. В., Фафурин В. А. Государственный первичный специальный эталон единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости ГЭТ 63-2019 // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-3-8>

State primary special standard of units of mass and volume of liquid in a stream, mass and volumetric flow rates of liquid GET 63-2019

Albert R. Tukhvatullin¹, Alexey V. Shchelchkov²✉, Viktor A. Fafurin³

^{1, 2} VNIIR, Affiliated branch of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

² A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI, Republic of Tatarstan, Russia

³ Kazan National Research Technological University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, fafurin.viktor@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3814-2544>

¹vniiir-etalon@bk.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7250-3246>

²avschelchkov@kai.ru✉, <http://orcid.org/0000-0002-67060679>

Abstract. The article describes aspects of improving metrological support for measuring units of mass and volume of liquid in the flow, mass and volume flow of liquid in the Russian Federation. We consider fundamentally new design solutions for key modules of the reference unit EU-3 of the state primary special standard for units of mass and volume of liquid in the flow, mass and volume flow of liquid GET 63-2019, based on numerical and physical modeling of hydrodynamic processes under forced pressure flow of the working medium (water) in pipelines with different flow geometry. The principles of operation of water flow stabilization and control modules are substantiated. Innovative solutions are presented for the design of sensitive elements of the flow switch, the principle of constructing a time diagram, and determining the measurement time interval. Metrological characteristics of the state primary special standard of units of mass and volume of liquid in the flow, mass and volume flow of liquid GET 63-2019 are presented.

Keywords: reference setting the budget of uncertainty, metrological characteristics, the free water surface, the radius of the nozzle, a uniform velocity profile.

Введение. Вопросы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкости в потоке наиболее актуальны в таких отраслях экономики страны, как топливно-энергетический комплекс, металлургия, химическая и пищевая промышленность, жилищно-коммунальное хозяйство. Потребности перечисленных отраслей экономики Российской Федерации стимулируют появление на рынке высокоточных средств измерений (СИ) расхода и количества жидкости, количество которых превышает 10 000 единиц. В Федеральном информационном фонде зарегистрировано порядка 500 типов СИ, предназначенных для измерений расхода и количества жидкости в диапазоне $0,1 \cdot 10^{-5}$ –2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$) с пределами относительной погрешности 0,05–0,25 %. Такое количество СИ способствует развитию и совершенствованию эталонной базы. На сегодняшний день в Российской Федерации существует 29 вторичных эталонов и более 300 рабочих эталонов 1-го, 2-го и 3-го разрядов, которые воспроизводят единицы расхода и количества жидкости в диапазоне $5 \cdot 10^{-3}$ –2000 т/ч.



a



б

Рис. 1. Внешний вид эталонной установки ЭУ-3:

a – модуль стабилизации и компенсатор длины; *б* – измерительная линия и весовые группы

Fig. 1. External view of the standard installation EU-3:

a – stabilization module and length compensator; *b* – measuring line and weight groups

Отсутствие отлаженной системы метрологического обеспечения измерений расхода и количества жидкости в потоке при значениях расхода более 500 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$) вынуждает держателей высокоточных СИ осуществлять поверку (калибровку) СИ на зарубежных эталонах [1–3] либо применять косвенный метод, либо осуществлять поверку (калибровку) в нижней части диапазона измеряемых расходов и в дальнейшем распространять полученные результаты на весь диапазон измеряемых расходов. Прослеживаемость СИ к Государственному первичному специальному эталону единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости ГЭТ 63-2017 можно осуществлять эталонными установками ЭУ-1 и ЭУ-2 в диапазоне расходов $0,1 \cdot 10^{-4}$ –500 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Метрологические характеристики СИ, определённые методом косвенных измерений, не соответствуют действительным метрологическим характеристикам, определённым методом сличения с помощью эталона сравнения. Данное несоответствие обусловлено влияющими динамическими факторами [4–6], которые не учитывает метод косвенных измерений. Метод сличений с эталоном сравнения регламентирован действующей государственной поверочной схемой [7], утверждённой приказом Росстандарта от 7 февраля 2018 г. № 256, позволяет оценить действительные метрологические характеристики СИ в целом без прослеживаемости к эталонам основных единиц измерений, заимствованных из других государственных поверочных схем.

Для сохранения позиций Российской Федерации в мировом метрологическом сообществе, в первую очередь в группе промышленно развитых стран, и расширения сети отечественных научных организаций как уполномоченных институтов, обладающих эталонной аппаратурой высокого уровня, 7 декабря 2019 г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 3394 утверждён Государственный первичный специальный эталон единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости ГЭТ 63-2019, в состав которого включена эталонная установка ЭУ-3 (рис. 1), обеспечивающая воспроизведение единиц расхода в диапазоне 5–2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$) (1,39–556 кг/с) с расширенной неопределённостью, не превышающей 0,036 % при доверительной вероятности $P=0,95$.

Высокие метрологические характеристики ГЭТ 63-2019 обеспечиваются реализацией уникальных научно-технических решений, заложенных при проектировании ключевых модулей, входящих в состав ЭУ-3.

Принцип действия модулей ЭУ-3. По принципу действия эталонная установка ЭУ-3 представляет условно замкнутую схему (рис. 2), включающую в себя модули хранения, создания, стабилизации и регулирования расхода рабочей среды (воды), а также модули взвешивания. В качестве рабочей среды на ЭУ-3 используется вода по СанПин 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения», к которой предъявляются следующие технические характеристики: температура

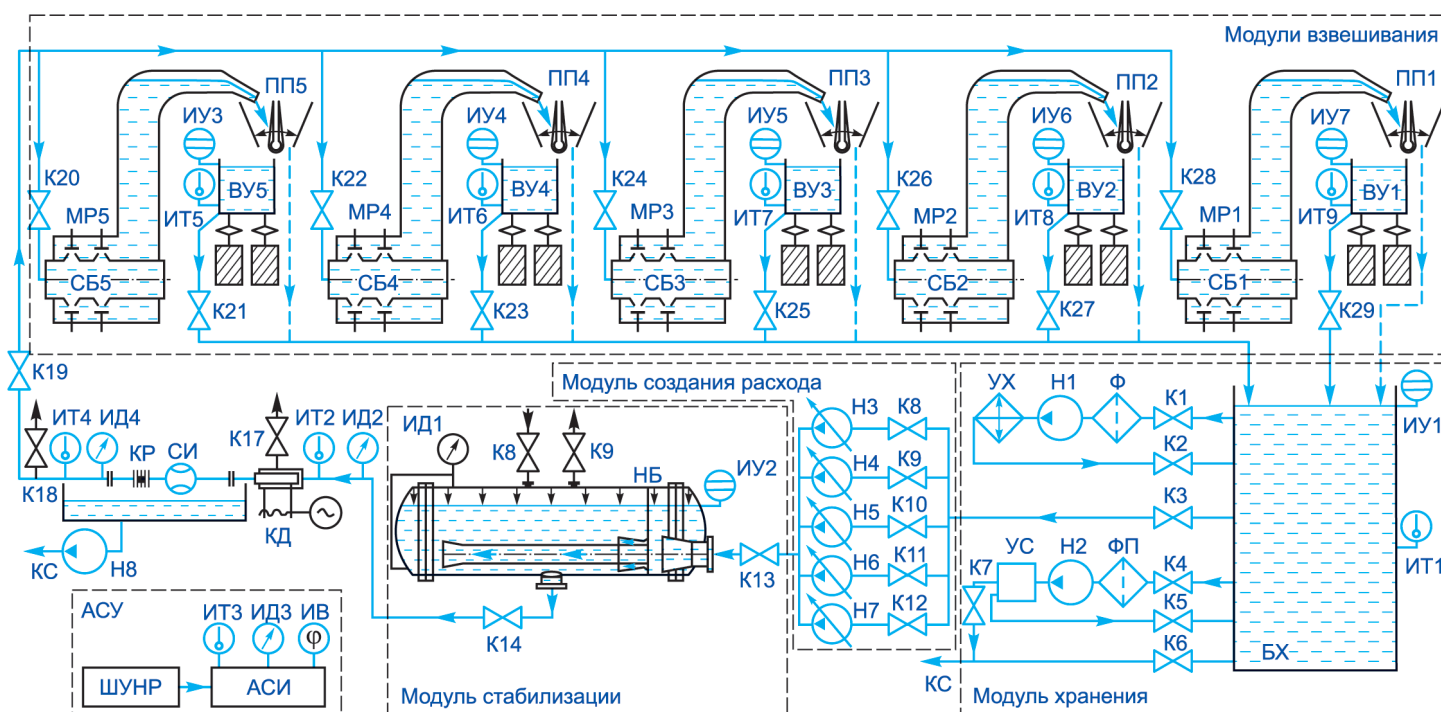


Рис. 2. Упрощённая гидравлическая схема эталонной установки ЭУ-3:

АСУ – автоматизированная система управления; АСИ – автоматизированная система измерений; БХ – бак-хранилище; ВУ – весовое устройство; ИД, ИУ, ИТ – измерители давления, уровня, температуры соответственно; К – краны (запорная арматура); КД – компенсатор длины; КР – компенсатор резиновый антивибрационный; КС – канализационный слив; МР – модуль регулирования расхода воды; Н – насос; НБ – напорный бак; ИВ – измеритель влажности; ПП – переключатель потока; СБ – сопловой блок; СИ – тестируемое средство измерений; УС – ультрафиолетовый стерилизатор; УХ – установка холодильная; Ф – фильтр; ФП – песочный фильтр; ШУНР – шкафы управления насосами распределительные.

Fig. 2. Simplified hydraulic diagram of the EU-3 reference installation:

ACS – automated control system; AMS – automated measurement system; ST – storage tank; WD – weighing device; MP, ML, MT – pressure, level, temperature meter, respectively; T – taps (shut-off valves); LC – length compensator; RC – rubber anti-vibration compensator; SD – sewer drain; FC – water flow control module; P – pump; PT – pressure tank; MM – moisture meter; D – diverter; NB – nozzle block; MUT – meter under test; US – ultraviolet sterilizer; RU – refrigeration unit; F – filter; SF – sand filter; DPCC – distribution pump control cabinets

воды $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, избыточное давление в диапазонах расходов 5–500 и 500–1000 т/ч соответственно 1,0 и 0,6 Мпа.

Модуль хранения рабочей среды состоит из бака-хранилища БХ (см. рис. 2) вместимостью более 250 м³ со специальной трехуровневой трубной обвязкой, системы термостатирования, химводоочистки и дегазации воды, измерительной ИД1, ИТ1 и запорной арматур (кранов) К1–К6. Автономная система термостабилизации обеспечивает условия эксплуатации ЭУ-3 при измерениях во всём диапазоне расхода 5–2000 т/ч (м³/ч). Температурный режим воды в зимний период поддерживается радиаторной градирней, а в летний период – холодильной установкой (чиллером) УХ. Трехступенчатая система химводоочистки позволяет осуществить механическую очистку в песочном фильтре ФП, обезжелезивание и ультрафиолетовое обеззараживание воды с помощью ультрафиолетового стерилизатора УС.

Модуль создания расхода воды включает в себя насосную станцию, состоящую из двух насосов Н3, Н4 производительностью 300 м³/ч каждый и трёх насосов Н5–Н7 производительностью 600 м³/ч, распределительные шкафы

управления насосами ШУНР и краны К8–К12. Вода из бака-хранилища посредством насосной станции Н3–Н6 подаётся в модуль стабилизации, являющийся одним из ключевых модулей ЭУ-3.

Модуль стабилизации расхода воды, включает в себя напорный бак НБ, систему сброса (кран К15) и надува (кран К16) воздуха, компрессор с ресивером, измеритель давления ИД1, измеритель уровня ИУ2 и краны К13–К16. Модуль стабилизации объединил положительные стороны двух методов создания расхода: гравиметрического, обеспечивающего высокую стабильность расхода воды и низкий уровень пульсаций в напорном трубопроводе, и градиентного, обеспечивающего широкий диапазон значений массового расхода воды и избыточного давления в напорном трубопроводе. Проточная часть напорного бака спрофилирована таким образом, что поток воды, поступающий из напорного трубопровода, разделяется на две части, формируемые на его противоположных сторонах. Оригинальный профиль проточной части уменьшает неравномерность уровня свободной поверхности воды в напорном баке.

Поддержание постоянного уровня свободной поверхности воды в напорном баке контролируется регулятором уровня, сигнал с которого поступает на частотные преобразователи насосной станции *НЗ–Н6*. Над свободной поверхностью воды в напорном баке создаётся воздушная подушка с постоянным значением заданного избыточного давления (до 1 МПа), это является одним из основных условий обеспечения стабильности расхода воды. Процесс поддержания постоянного значения давления сжатого воздуха осуществляется при его поступлении и стравливания из подушки через дискретный набор критических сопел, входящих в состав системы сброса *K15* и наддува *K16*. Каждое из сопел закрывается или открывается клапаном, который управляется

пневмораспределителем по сигналу от измерителя избыточного давления воздуха *ИД1* в воздушной подушке бака. Стабилизация уровня свободной поверхности воды и избыточного давления в воздушной подушке напорного бака обеспечивает стабильность поддержания расхода воды через измерительную линию ЭУ-3 во всём диапазоне расхода 5–2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$), колебания расхода не превышают 0,01 %.

Вода из модуля стабилизации поступает через компенсатор длины *КД* в измерительную линию. Телескопическая конструкция компенсатора длины обеспечивает герметичность при минимальном гидравлическом сопротивлении. Длина измерительной линии составляет 20 м, т. е. относительная длина составляет более 50 калибров при максимальном диаметре трубопровода 0,4 м (DN 400) [8]. Измерительная линия имеет широкую номенклатуру сменных прямолинейных участков в диапазоне 0,05–0,4 м (DN 50 – DN 400).

В зависимости от заданного значения расхода поток воды поступает в одну или несколько очередей (групп). Очереди оснащены модулями взвешивания воды, регулирования расхода воды *МР1–МР5* (см. рис. 2) и устройствами переключения потока *ПП1–ПП5*. Первая очередь предназначена для измерений в диапазоне расхода 5–50 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$). Очереди со второй по пятую являются идентичными по конструктивным размерам и предназначены для измерений расхода в диапазоне расхода 50–2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Модули регулирования расхода *МР1–МР5* также являются одними из ключевых модулей ЭУ-3. Каждый модуль регулирования расхода выполнен по схеме «труба в трубе». Вода после измерительного стола из напорной магистрали с рабочим давлением поступает во внутренние трубы сопловых блоков *СБ1–СБ5*. Основными элементами модулей регулирования являются радиусные сопла [9–11]. Проточная часть каждого радиусного сопла спрофилирована таким образом, чтобы при максимальном перепаде давления на радиусном сопле исключить кавитацию вдоль всей его образующей [11]. Требуемое значение расхода воды через измерительный трубопровод ЭУ-3 устанавливается дискретно путём включения в работу (открытия) соответствующей комбинации радиусных сопел, расположенных на внутренних трубах сопловых блоков *СБ1–СБ5*. Каждое радиусное сопло снабжено клапаном с пневмоприводом, что позволяет обеспечивать быстрое включение в работу требуемое количество и номенклатуру радиусных сопел и, соответственно, установку заданного значения расхода. Точная регулировка расхода воды до заданного значения через измерительную линию выполняется изменением давления в воздушной подушке над свободной поверхностью воды в напорном баке. Далее через набор радиусных сопел вода попадает в наружные трубы модулей регулирования *МР1–МР5*, из которых по каналам прямоугольного сечения попадает в переключатели потока *ПП1–ПП5*.

Геометрия проточной части сопла 1 (рис. 3, а) каждого из переключателей потока *ПП1–ПП5* в ЭУ-3 представляет собой открытый прямоугольный канал с низконапорным турбулентным течением воды. Данная геометрия позволила обеспечить 100 % заполнение водой среза сопла и реализовать близкий к равномерному профиль скорости в срезе сопла для всего диапазона массового расхода. Исполнительный

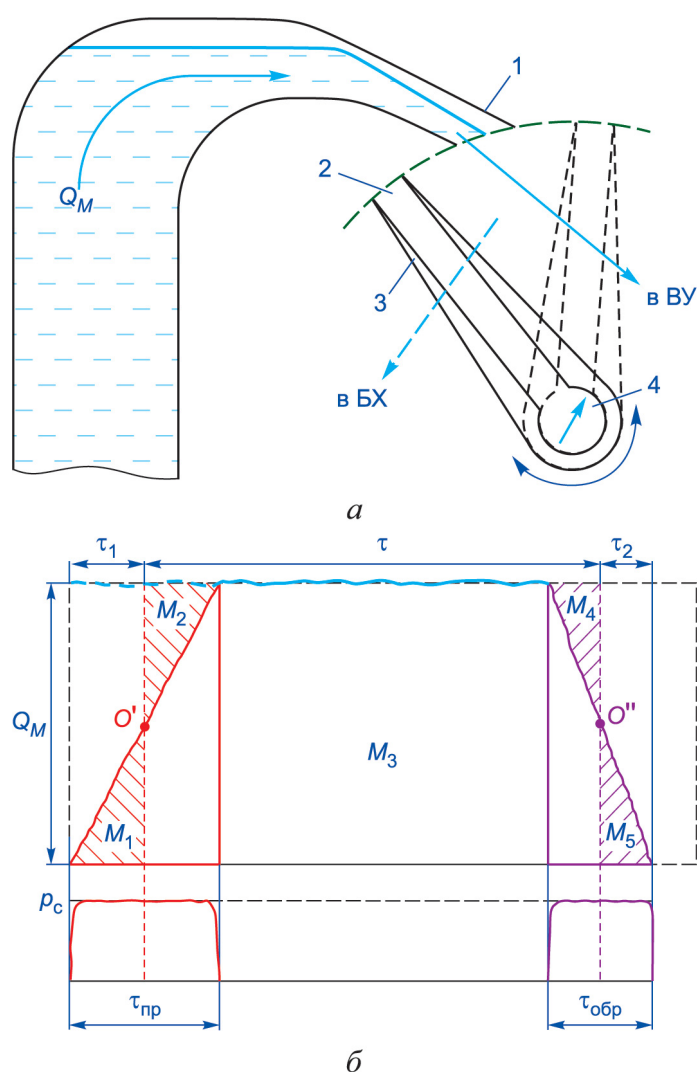


Рис. 3. Принцип работы переключателя потока ЭУ-3:

а – принципиальная схема; б – временная диаграмма; 1 – проточная часть сопла; 2, 4 – канал отбора давления и датчик давления соответственно; 3 – нож

Fig. 3. The principle of operation of the flow switch EU-3:

а – schematic diagram; б – timing diagram; 1 – flow part of the nozzle; 2, 4 – pressure take-off channel and pressure sensor; 3 – knife

механизм переключателя потока представляет собой сдвоенный лоток, открытый сверху и снизу, разделённый посередине перегородкой – ножом 3. Чувствительными элементами каждого переключателя потока являются измерители полного давления, которые включают в себя каналы отбора давления 2 и датчики 4 полного давления, расположенные в кромке ножа 3 исполнительного механизма.

Измеренные значения полного давления p_c (см. рис. 3, б) позволяют рассчитать зависимость w_c скорости потока воды в срезе сопла переключателя потока от времени прямого $\tau_{пр}$ и обратного $\tau_{обр}$ ходов переключателя потока. Абсциссу точки O' принимают за начало отсчёта интервала времени заполнения τ весового устройства, которая определяет равенство площадей треугольников $M_1 = M_2$. Аналогичным образом абсциссу точки O'' принимают за окончание отсчёта интервала времени заполнения τ весового устройства, которая определяет равенство площадей треугольников $M_4 = M_5$. Сумма площадей треугольников $(M_1 + M_2) + (M_4 + M_5) = M_{ВУ}$ эквивалентна массе $M_{ВУ}$ жидкости, попавшей в весовое устройство за время прямого $\tau_{пр}$ и обратного $\tau_{обр}$ ходов переключателя потока соответственно. Очевидно, что значения τ_1 , τ_2 определяются профилем скорости (давления) $w_c = f(p_c)$, т. е. напрямую зависят от структуры потока жидкости в срезе сопла переключателя потока.

Реализация уникальных научно-технических решений в модулях стабилизации, регулирования расхода и переключателя потока ЭУ-3 позволила минимизировать влияние основных влияющих динамических факторов, таких как колебания расхода воды, фрагментарность заполнения водой и неравномерность профиля скорости воды в срезе сопла переключателя потока [4–6], что обеспечило выполнение условия эквивалентности баланса масс:

$$\rho w_{СИ} F_{СИ} \tau = M_{СИ} \equiv M_{ВУ} = Q_M \tau = M_2 + M_3 + M_4,$$

где ρ – плотность воды; w – средняя расходная скорость воды; $F_{СИ}$ – поперечное сечение исследуемого СИ; τ – интервал времени измерений; $M_{СИ}$ – масса жидкости в потоке; $M_{ВУ}$ – масса жидкости в весовом устройстве; Q_M – массовый расход воды; M_2 , M_3 , M_4 – площади (см. рис. 3), эквивалентные массе жидкости в весовом устройстве.

Таким образом, масса жидкости в потоке $M_{СИ}$, прошедшая через поперечное сечение $F_{СИ}$ исследуемого СИ за время τ , тождественно равна массе жидкости $M_{ВУ}$, попавшей в бак весового устройства.

Переключатели потока ПП1–ПП5 (см. рис. 2) в зависимости от заданного значения расхода Q_M направляют поток воды в баки весовых устройств ВУ1–ВУ5 на один или несколько модулей взвешивания. Объём бака весового устройства первой очереди, применяемого в диапазоне расхода 5–50 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$), составляет 2 м^3 , для очередей со второй по пятую в диапазоне 50–500 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$) – 9,2 м^3 . Баки весовых устройств оборудованы успокоителями потока. Максимально допустимая измеряемая масса модуля первой очереди не превышает 2000 кг, для каждого модуля со второй по пятую очередь – 8000 кг. Модули взвешивания выполнены по одной конструктивной схеме. Бак весового устройства смонтирован

на платформе, которая установлена на трёх колоннах, в полости колонн расположены цифровые тензометрические датчики точностью класса С10 согласно ГОСТ 8.631-2013 (OIML R 60:2000) «Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики весоизмерительные. Общие технические требования. Методы испытаний».

Каждый модуль взвешивания оборудован системой автоматизированного исследования метрологических характеристик весовой группы, в которую входят исполнительные подъёмные механизмы – линейные актуаторы и грузы, размещённые на стержнях. Первая очередь – 81 шт. (номинальная масса каждого груза 20 кг), для остальных четырёх очередей – 81 шт. (номинальная масса каждого груза 100 кг). Каждая платформа имеет по девять точек подвеса (нагрузки) стержней с грузами. На каждом стержне размещается по девять грузов. Система автоматизированного исследования метрологических характеристик весовых групп позволяет выполнять исследования с высокой периодичностью, в том числе непосредственно перед каждым исследованием СИ.

После измерений вода из модулей взвешивания по системе сливных трубопроводов, оснащённых эжекторами, поступает обратно в бак-хранилище модуля хранения.

Автоматизированная система управления АСУ (см. рис. 2) предназначена для сбора и обработки измерительной информации, поступающей от весовых устройств, модуля регулирования расхода воды, исследуемых СИ, переключателей потока, преобразователей температуры и давления воды, формирования протоколов исследования, поверки и калибровки на электронных и бумажных носителях, а также для контроля параметров окружающей среды – температуры и относительной влажности воздуха, атмосферного давления.

Уравнения измерений единиц величин, воспроизводимых каждой очередью ЭУ-3, составлены в соответствии с положениями международного стандарта ISO 4185 «Measurement of liquid flow in closed conduits. Weighing method».

Метрологические характеристики ЭУ-3 в составе ГЭТ 63-2019. Метрологические характеристики ЭУ-3 в составе ГЭТ 63-2019 приведены в таблице, где u_A , u_B – стандартные неопределённости воспроизведения соответственно по типу А (при 11 независимых измерениях) и типу В, U – расширенная неопределённость воспроизведения (при коэффициенте охвата $k=2$). Диапазон воспроизведения единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости составляет 5–2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Расширение воспроизводимого ГЭТ 63-2019 диапазона расхода и количества жидкости потребовало пересмотра действующей государственной поверочной схемы. Основные

Метрологические характеристики ЭУ-3

Характеристика	$u_A \cdot 10^5$	$u_B \cdot 10^4$	$U \cdot 10^4 (k=2)$
Масса жидкости в потоке $M_{СИ}$	2,93	1,75	3,56
Объём жидкости в потоке $V_{СИ}$	2,96	1,76	3,57
Массовый расход Q_M	2,94	1,75	3,54
Объёмный расход Q_V	2,94	1,76	3,58

изменения коснулись диапазона воспроизводимых расходов ГЭТ 63-2019, вторичных и рабочих эталонов 1-го, 2-го и 3-го разрядов. Проект государственной поверочной схемы в настоящее время в процессе утверждения.

Заключение. Внедрение ГЭТ 63-2019 позволит обеспечить воспроизведение единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости в диапазоне значений расходов 0,01–2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$). Внедрение эталонной установки ЭУ-3 в составе ГЭТ 63-2019 и новой государственной поверочной схемы позволит удовлетворить возрастающие потребности реальных секторов экономики, обеспечить достоверность и повысить точность учёта энергоресурсов, в том числе воды и других жидкостей.

Список литературы

1. Engel R., Beyer K., and Baade H.-J., *Measurement Science and Technology*, 2012, vol. 23, no. 7, p. 074020. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/7/074020>
2. Chun S., Yoon B.-R., *Uncertainty evaluation of flow meter calibration by gravimetric water flow standards at kriss, 18th Int. Conf. on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (ASME)*, Virtual, Online, July 13–15, 2020, vol. 1, no. V001T02A013. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2020-20045>
3. Zhu L., Zhang J., Zhang H., Chen Y., Meng X., *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 511–516. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0144>
4. Engel R., Baade H.-J., *Impacts upon the measurement uncertainty of liquid-flow facilities originating from random-like variations of the flow parameters, 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement*, At Colorado Springs, CO, USA, June 20–22, 2012, available at: <https://www.researchgate.net/publication/260596798> (accessed: 12.10.2020).
5. Shimada T., Oda S., Terao Y., Takamoto M., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, pp. 89–96. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(03\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(03)00016-5).
6. Корнеев Р. А., Тухватуллин А. Р., Фафулин В. А., Щелчков А. В. Оценка влияния переключателя потока на метрологические характеристики поверочных установок единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости // *Измерительная техника*. 2019. № 4. С. 14–19. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-4-42-47>
7. Атаева А. И., Корнеев Р. А., Тухватуллин А. Р., Нигматуллин Р. Р. Государственная поверочная схема для средств измерений массы и объема жидкости в потоке, объема жидкости и вместимости при статических измерениях, массового и объемного расходов жидкости // *Законодательная и прикладная метрология*. 2018. № 5. С. 17–20.
8. Shchelchikov A., *Heat Transfer Research*, 2016, vol. 47, no. 6, pp. 545–557. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2016010129>
9. Ashrafizadeh S. M., Ghassemi H., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, vol. 42, no. 01, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.12.007>

10. Schumann D., Kroner C. *Using Cavitation Metrologically, 10th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM)*, Queretaro, Mexico, March 21–23, 2018, available at: http://www.measurementlibrary.com/docs_library/events/isffm2018/Docs/Schumann.pdf (accessed: 12.10.2020).

11. Крапиров Д. В., Михеев Н. И., Молочников В. М., Сайшин И. И., Тухватуллин А. Р., Фафулин В. А. Радиусные сопла для бескавитационного истечения воды при высоких перепадах давления // *Измерительная техника*. 2017. № 9. С. 37–39. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1292-2>

References

1. Engel R., Beyer K., and Baade H.-J., *Measurement Science and Technology*, 2012, vol. 23, no. 7, p. 074020. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/7/074020>
2. Chun S., Yoon B.-R., *Uncertainty evaluation of flow meter calibration by gravimetric water flow standards at kriss, 18th Int. Conf. on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels (ASME)*, Virtual, Online, July 13–15, 2020, vol. 1, no. V001T02A013. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2020-20045>
3. Zhu L., Zhang J., Zhang H., Chen Y., Meng X., *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 511–516. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0144>
4. Engel R., Baade H.-J., *Impacts upon the measurement uncertainty of liquid-flow facilities originating from random-like variations of the flow parameters, 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement*, At Colorado Springs, CO, USA, June 20–22, 2012, available at: <https://www.researchgate.net/publication/260596798> (accessed: 12.10.2020).
5. Shimada T., Oda S., Terao Y., Takamoto M., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, pp. 89–96. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(03\)00016-5](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(03)00016-5).
6. Korneev R. A., Tikhvatullin A. R., Fafurin V. A., Shchelchikov A. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 347–353. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01628-8>
7. Ataeva A. I., Korneev R. A., Tikhvatullin A. R., Nigmatullin R. R., *Zakonodatel'nyy and Prikladnaya Metrologiya*, 2018, no. 5, pp. 42–47 (in Russian).
8. Shchelchikov A., *Heat Transfer Research*, 2016, vol. 47, no. 6, pp. 545–557. <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.2016010129>
9. Ashrafizadeh S. M., Ghassemi H., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2015, vol. 42, no. 01, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.12.007>
10. Schumann D., Kroner C. *Using Cavitation Metrologically, 10th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM)*, Queretaro, Mexico, March 21–23, 2018, available at: http://www.measurementlibrary.com/docs_library/events/isffm2018/Docs/Schumann.pdf (accessed: 12.10.2020).
11. Kratirov D. V., Mikheev N. I., Molochnikov V. M., Saushein I. I., Tikhvatullin A. R., Fafurin V. A., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 912–915. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1292-2>

Статья поступила в редакцию 21.10.2020; принята к публикации 19.11.2020.