

ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья


УДК 532.542

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-71-82>



ГЭТ 63–2019: новаторский метод стабилизации расхода жидкости в эталонной установке 3

А. Р. Тухватуллин  

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Казань, Россия
 vniir-etalon@bk.ru

Аннотация: Установление наивысшей точности национальных первичных эталонов единиц массового и объемного расходов (массы и объема) жидкости (воды) входит в число приоритетов в национальной экономике большинства государств. В Российской Федерации и за рубежом принцип действия эталонов единиц расхода и количества жидкости основан на гравиметрическом методе взвешивания, т. е. на измерении массы жидкости, поступившей в весоизмерительную емкость за определенный интервал времени осреднения. Решающим условием точности результата работы такого эталона является стабилизация расхода жидкости, а также выбор оптимального способа создания вынужденного течения жидкости в напорном трубопроводе и измерительной линии. Повсеместно принятый метод создания вынужденного течения жидкости путем размещения ее на высоте или подачи с использованием насосов имеет одно неудобное следствие – громоздкость конструкции эталона. Создание такой конструкции влечет за собой экономические, трудовые и временные затраты, что может негативно сказаться на условиях и результатах испытаний.

Минимизировать неудобства позволяет принятый в фокус внимания автора новаторский метод активного демпфирования колебаний давления и расхода жидкости, который позволяет исключить необходимость размещения напорного бака на большую высоту над уровнем земли. Данный метод реализован в напорном трубопроводе и измерительной линии эталонной установки 3 Государственного первичного специального эталона единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости ГЭТ 63–2019.

Цель статьи – доказательно обосновывать и экспериментально подтвердить высокую эффективность данного метода.

Результаты экспериментальных исследований изменения абсолютного давления в воздушной подушке и уровня жидкости в напорном баке модуля стабилизации подтвердили работоспособность предложенного метода на основании полученных минимальных значений относительных отклонений мгновенного и усредненного расходов жидкости. Приведенное в статье инженерное решение представляет интерес для хозяйствующих субъектов и коммерческих организаций, заинтересованных в снижении издержек на проведение испытаний объемного расхода (массы и объема) жидкости (воды).

Ключевые слова: демпфер, амплитуда пульсаций, частота колебаний давления, радиусные сопла, стабильность расхода

Ссылка при цитировании: Тухватуллин А. Р. ГЭТ 63–2019: новаторский метод стабилизации расхода жидкости в эталонной установке 3 // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 5. С. 71–82. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-71-82>

Статья поступила в редакцию 15.07.2023; одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 25.12.2023.


MEASUREMENT STANDARDS

Review Article

GET 63–2019: Innovative Method for Stabilizing Liquid Flow Rate in a Reference Installation 3

Al'bert R. Tukhvatullin  

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

 vniir-etalon@bk.ru

Abstract: Establishing the pinpoint accuracy of national primary standards for units of mass and volume flow rates (mass and volume) of liquid (water) is a priority in the national economy of most states. In Russia and abroad, the principle of operation of standards for units of flow rate and amount of liquid is based on the gravimetric weighing method, i.e., on measuring the mass of liquid entering a weighing container over a certain averaging time interval. The decisive condition for the accuracy of the result of the standard is the stabilization of liquid flow rate, as well as the choice of the optimal method for creating a forced flow of liquid in the pressure pipeline and measuring line. The widely accepted method of creating a forced flow of liquid by placing it at a height or supplying it using pumps has one inconvenient consequence – the bulkiness of the standard design. The creation of such a design entails economic, labor, and time costs, which can adversely affect the test conditions and results. The author's innovative method of active damping of pressure and fluid flow fluctuations, which eliminates the need to place the pressure tank at a great height above ground level, allows minimizing inconveniences. This method is implemented in the pressure pipeline and measuring line of the reference installation 3 of the State Primary Special Standard of Units of Mass and Volume of Liquid in a Flow and of Mass and Volume Flow Rates of a Liquid GET 63–2019. The purpose of the article is to substantiate and experimentally confirm the high efficiency of this method. The results of experimental research of changes in the absolute pressure in the air cushion and the liquid level in the pressure tank of the stabilization module confirmed the efficiency of the proposed method based on the obtained minimum values of the relative deviations of the instantaneous and average liquid flow rates. The engineering solution presented in the article is of interest to economic entities and commercial organizations interested in reducing the costs of testing the volumetric flow rate (mass and volume) of liquid (water).

Keywords: damper, pulsation amplitude, pressure oscillation frequency, radial nozzles, flow stability

For citation: 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>

The article was submitted 15.07.2023; approved after reviewing 03.10.2023; accepted for publication 25.12.2023.

Введение

Национальные первичные эталоны единиц массового и объемного расходов (массы и объема) жидкости (воды) являются установками с наивысшей в своих странах точностью. Так, по данным, опубликованным на официальном сайте МБМВ¹, расширенная неопреде-

ленность (total expanded uncertainty) национального эталона Германии составляет 0,040 %, Японии – от 0,039 до 0,081 %, Китая – 0,045 %.

В целях достижения столь высоких показателей точности принцип измерений в таких эталонах в абсолютном большинстве случаев основан на гравиметрическом методе взвешивания, т. е. на измерении массы жидкости, поступившей в весоизмерительную емкость за определенный интервал времени осреднения.

Напорное течение жидкости в трубопроводе эталонов может быть организовано за счет гидродинамического давления столба жидкости, которую подняли на пьезометрическую высоту (напорная башня) (рис. 1а) [1, 2],

¹ МБМВ (Международное бюро мер и весов, фр. Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) хранит международные эталоны основных единиц; выполняет международные метрологические работы, связанные с разработкой и хранением международных эталонов, сличением национальных эталонов с международными и между собой; проводит исследования в области метрологии, направленные на увеличение точности измерений.

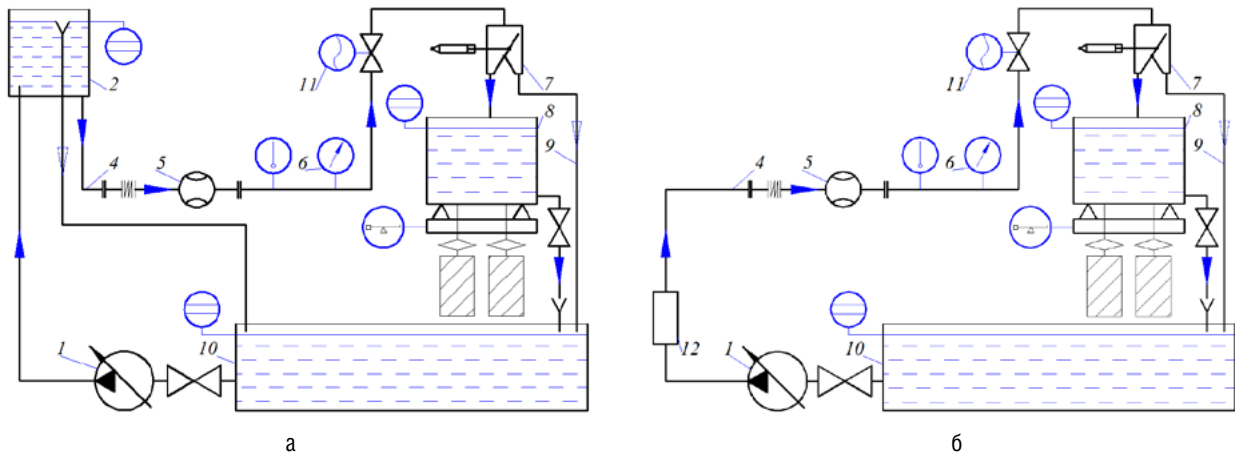


Рис. 1. Принципиальные схемы эталонов, классифицируемые по принципу создания вынужденного напорного течения жидкости: а – напорный бак; б – насосы: 1 – насосы; 2 – напорный бак; 3 – магистраль водослива; 4 – измерительная линия; 5 – поверяемое (калибруемое) СИ; 6 – измеритель температуры; 7 – переключатель потока; 8 – весоизмерительная емкость; 9 – переливная магистраль; 10 – бак-хранилище; 11 – управляющий клапан; 12 – демпфер

Fig.1. Schematic diagrams of standards classified according to the principle of creating a forced pressure flow of liquid: а – pressure tank; б – pumps: 1 – pumps; 2 – pressure tank; 3 – drainage line; 4 – measuring line; 5 – verifiable (calibrated) measuring instrument; 6 – temperature meter; 7 – flow switch; 8 – weighing capacity; 9 – overflow line; 10 – storage tank; 11 – control valve; 12 – damper

а также при реализации градиента давления (с использованием насосов) (рис. 1б). Данные методы создания напорного течения имеют свои преимущества и недостатки. Так, при использовании напорной башни получают стабильные во времени значения воспроизводимого расхода жидкости при относительно невысоких значениях абсолютного давления жидкости в напорном трубопроводе, величина которых зависит от высоты пьезометрического столба жидкости. При использовании насосов достигаются высокие значения абсолютного давления в напорном трубопроводе, превышающие 1 МПа, что отвечает требованиям, предъявляемым к современным высокоточным средствам измерений расхода и количества жидкости (СИ). Однако в случае использования насосов имеют место колебания значений абсолютного давления в напорном трубопроводе и, как следствие, – нестабильность во времени значения воспроизводимого расхода жидкости.

В основе работы эталона лежит принцип, в соответствии с которым напорное течение жидкости в трубопроводе осуществляется системой создания расхода 1 (насосами). Жидкость нагнетается насосами в напорный бак 2 (см. рис. 1а), расположенный на заданной высоте относительно уровня земли (на высоте не менее 15 метров). Конструкция напорного бака обеспечивает постоянный уровень воды при помощи водослива 3, через который излишек жидкости возвращается обратно в бак-хранилище 10. Тем самым поддерживается

постоянное гидродинамическое давления столба жидкости в напорном трубопроводе и измерительной линии эталона.

Основной поток проходит через измерительную линию 4, в которой устанавливается поверяемое (калибруемое) СИ 5, управляющий клапан 11, который обеспечивает их заполнение жидкостью, а также регулирует значение абсолютного давления. Далее поток жидкости, минув весоизмерительную емкость 8, возвращается в бак-хранилище по магистрали 9. После стабилизации заданного значения расхода срабатывает переключатель потока 7 и жидкость поступает в весоизмерительную емкость 8. По истечении заданного временного интервала (или после набора определенной массы жидкости) происходит срабатывание устройства переключения потока 7, и поступление жидкости в весоизмерительную емкость 8 прекращается. После успокоения жидкости в весоизмерительной емкости 8 определяются значения интервала времени измерений τ и массы жидкости.

Оценка метрологических характеристик поверяемого (калибруемого) СИ заключается в сличении массы жидкости, поступившей в весоизмерительную емкость за интервал времени измерений τ , и массы жидкости, прошедшей через поверяемое (калибруемое) СИ за аналогичный интервал времени измерений τ . В таком случае синхронизация интервала времени измерений τ поступления жидкости в весоизмерительную емкость 8 и интервала времени измерений τ массы жидкости,

прошедшей через поперечное сечение средства измерений, с достаточной точностью возможна при условии стабильности воспроизводимого расхода жидкости.

Стабильность расхода определяется его отклонением от среднего значения на установившемся режиме работы эталона.

Эталоны с постоянным значением гидродинамического давления столба жидкости (рис. 1а) позволяют обеспечить высокую стабильность расхода жидкости в измерительной линии. Однако в этой схеме величина давления в измерительной линии ограничена высотой расположения напорного бака над уровнем земли. Например, пьезометрический столб жидкости высотой 10 метров обеспечивает гидродинамическое давление, равное 0,1 МПа в напорном трубопроводе эталона. При этом необходимо учитывать потери давления в напорном трубопроводе, обусловленные номинальным перепадом давления в проточной части СИ. Таким образом, при поверке (калибровке) кориолисового расходомера потребуются увеличение пьезометрического столба жидкости до высоты не менее 20 метров. Реализация данного технического решения требует капитальных затрат на строительство высотного сооружения.

Альтернативой данного технического решения являются эталоны, спроектированные с использованием насосов 1, которые обеспечивают вынужденное напорное течение жидкости в напорном трубопроводе за счет создания градиента давления заданной величины [3] (рис. 1б), а величина абсолютного давления в напорном трубопроводе и измерительной линии 4 определяется расходно-напорными характеристиками насосов 1. Реализация данного технического решения предполагает колебания заданных значений давления и расхода жидкости, амплитуда и частота которых определяется, главным образом, конструкцией насосов и режимами их работы [4, 5]. Для центробежных насосов, чаще всего используемых в эталонах расхода жидкости, основной компонентой колебаний потока является лопаточная гармоника, частота которой равна произведению числа лопаток на число оборотов насоса. Для снижения амплитуды этих колебаний перед измерительной линией 4 иногда устанавливается специальный демпфер 12.

Наиболее распространено использование пассивных демпферов с эластичной разделительной диафрагмой (мембраной) [6–9]. Пассивный демпфер с эластичной диафрагмой применяется в составе эталонной установки 1 Государственного первичного специального эталона единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости

ГЭТ 63–2019 (далее ГЭТ 63–2019) [10], представляет собой герметичный сосуд, который устанавливается в гидравлический тракт непосредственно после системы создания расхода (насосов). Варианты конструктивного исполнения демпферов представлены в работе [11]. Согласно исследованиям из [12], пассивный демпфер с эластичной диафрагмой эффективен лишь в определенном диапазоне частот, снижает уровень колебаний давления в диапазоне относительно низких частот, а также непригоден для применения в системах с высоким (порядка 1 МПа) абсолютным давлением жидкости [7].

Помимо пассивных демпферов с эластичной мембраной для устранения колебаний давления напорного потока жидкости в трубопроводах используют резонаторы Гельмгольца, расширительные камеры с тройниковым фильтром и пружинные компенсаторы колебаний с дополнительной массой [7]. Однако эти демпферы являются однорежимными, т. е. обеспечивают снижение амплитуды пульсаций на частоте колебаний, которая определяется геометрическими параметрами демпфера. Для расширения частотного диапазона работы таких демпферов существует ряд модификаций, которые позволяют несколько расширить диапазон частот, в которых происходит снижение амплитуды пульсаций, при этом усложняется конструкция и возрастает стоимость таких демпферов. Эффективность демпферов, выполненных по типу бокового ответвления трубопроводов, снижается при частотах пульсаций, превышающих 50–75 Гц [13], что характерно для работы центробежных насосов.

Обзор конструкций существующих демпфирующих устройств, применяемых в настоящее время в эталонах, показал, что они не решают в полной мере проблему снижения амплитуды пульсаций на частоте колебаний давления и расхода жидкости.

Поэтому при создании эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019 был реализован новый подход к обеспечению стабильности давления и расхода жидкости в напорном трубопроводе эталона, который заключается в использовании активного демпфера. Конструкция активного демпфера представляет собой напорный бак с оригинальной геометрией проточной части. Напорный бак заполнен жидкостью с заданным значением уровня свободной поверхности, над которой создается воздушная подушка с автоматическим поддержанием в ней заданного значения абсолютного давления. При поддержании заданных значений абсолютного давления в воздушной подушке и уровня свободной поверхности жидкости в напорном баке обеспечивается низкий уровень

амплитуды пульсаций на частоте колебаний давления и расхода жидкости. Данное конструктивное решение активного демпфера позволило исключить необходимость размещения напорного бака на большую высоту над уровнем земли. При этом обеспечивается поддержание высоких значений (до 1,1 МПа) абсолютно го давления в напорном трубопроводе и измерительной линии эталона.

Цель работы – обоснование новаторского метода к обеспечению стабильности потока в напорном трубопроводе и измерительной линии эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019, который заключается в активном демпфировании колебаний давления и расхода жидкости.

Общее описание эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019

Эталонная установка 3 ГЭТ 63–2019 предназначена для воспроизведения единиц массы и объема жидкости в потоке (при динамических измерениях), массового и объемного расходов жидкости в диапазоне расходов от 5 до 2000 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$). Значения абсолютного давления жидкости в напорном трубопроводе варьируются в диапазоне от 1,0 до 0,6 МПа при изменении диапазонов расходов жидкости от 5 до 500 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$) и от 500 до 2000 т/ч соответственно.

По принципу действия эталонная установка 3 представляет условно замкнутую схему (рис. 2), включающую в себя модули хранения, создания, стабилизации и регулирования расхода рабочей среды (воды), а также модули взвешивания.

Рабочая жидкость (вода) из бака-хранилища БХ при помощи насосов (каждый из которых оснащен частотным преобразователем) из модуля создания расхода поступает в напорный бак НБ модуля стабилизации (объемом $9,2 \text{ м}^3$, выполнен в форме горизонтального цилиндра с торцевыми полуэллиптическими боковинами). Над уровнем жидкости в напорном баке с помощью компрессора с ресивером и блока критических сопел создается воздушная подушка с заданным значением абсолютного давления (до 1,1 МПа).

Вода из модуля стабилизации поступает в измерительную линию, оснащенную самостопорящимся компенсатором длины КД, с поверяемым (калибруемым) СИ. В зависимости от заданного значения расхода поток воды поступает в одну или несколько очередей (групп). Первая очередь предназначена для измерений расхода и количества жидкости в диапазоне расходов от 5 до 50 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$); очереди со второй по пятую – от 50 до 500 т/ч ($\text{м}^3/\text{ч}$). Каждая очередь оснащена модулем взвешивания воды, модулем регулирования

расхода воды МР1 – МР5 и устройством переключения потока ПП1 – ПП5.

Величина расхода жидкости в гидравлическом тракте регулируется изменением количества работающих насосов насосной станции и (или) изменением частоты вращения приводов насосов при помощи частотных преобразователей. Значение расхода имеет две степени регулировки: грубая и точная. Для грубой регулировки требуемого расхода подбирается необходимая комбинация радиусных сопел [14] в модулях регулирования. Каждое сопло снабжено автоматически управляемым клапаном, что позволяет обеспечивать включение в работу сопел требуемого количества и номенклатуры. При выборе комбинации сопел используются расчетные значения расхода через них при заданном уровне давления в воздушной подушке напорного бака. Погрешность такого расчета составляет порядка 1 %. Кроме того, само расчетное значение расхода не может точно соответствовать заданному значению из-за дискретности набора сопел. Если в области максимальных расходов имеющийся набор сопел позволяет подбирать расчетное значение расхода с отклонением от любого заданного значения не более 1 %, то в области малых расходов такое отклонение существенно больше, но не превышает 5 %. Такое возможное отклонение компенсируется точной регулировкой расхода за счет изменения уровня давления в воздушной подушке напорного бака модуля стабилизации, допускающего плавное регулирование.

Стоит отметить, что номенклатура включенных в работу (открытых) радиусных сопел не изменяется как при выходе системы на режим (в процессе грубой и точной регулировок), так и при работе на заданном режиме. В таком случае набор радиусных сопел представляет собой комбинированное сужающее устройство, по динамике изменения перепада давления на котором можно судить о динамике изменения расхода жидкости в измерительной линии.

Из модулей регулирования по каналам прямоугольного сечения жидкость поступает на переключатели потока ПП1 – ПП5 через лоток. Геометрия проточной части сопла переключателей потока ПП1 – ПП5 представляет собой открытый прямоугольный канал с низконапорным турбулентным течением воды, давление над которой соответствует атмосферному. Переключатели потока направляют рабочую жидкость либо на один или несколько баков весовых устройств ВУ1 – ВУ5 модулей взвешивания, либо в магистраль, по которой жидкость возвращается в бак-хранилище.

После выхода эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019 на режим стабильность воспроизводимого расхода

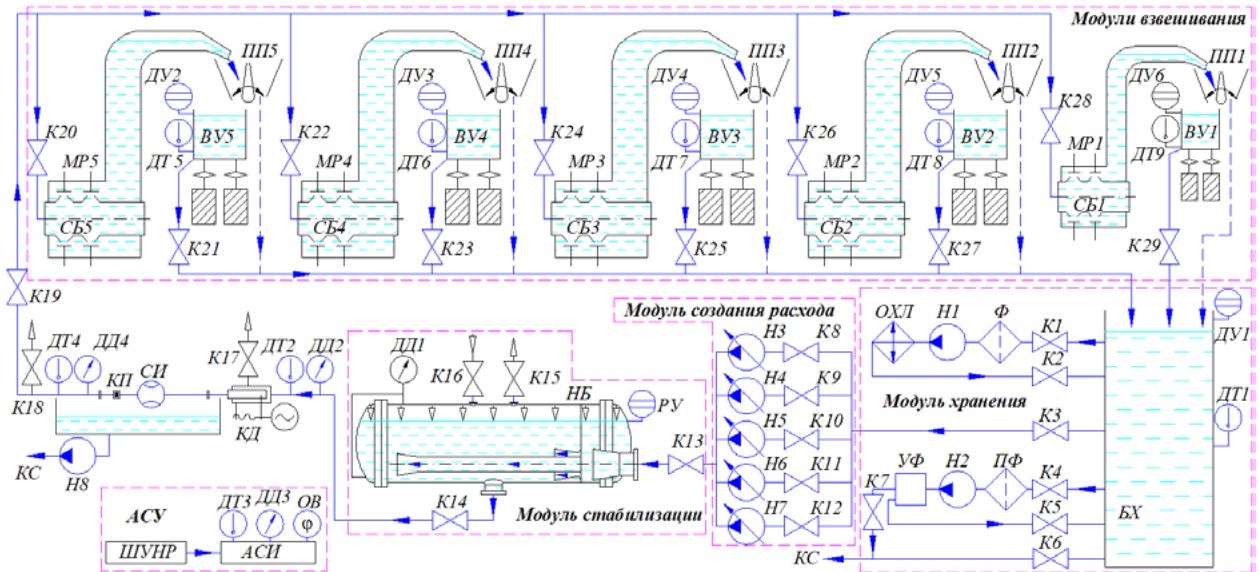


Рис. 2. Принципиальная схема эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019: АСУ – автоматизированная система управления; АСИ – автоматизированная система измерений; БХ – бак-хранилище; ВУ – модуль взвешивания; ДД – измеритель давления; ДУ – измеритель уровня; ДТ – измеритель температуры; К – запорная арматура; КД – компенсатор длины; КП – компенсатор резиновый антивибрационный; КС – канализационный слив; МР – модуль регулирования расхода воды; Н – насос; НБ – напорный бак; ОВ – измеритель влажности; ОХЛ – холодильная установка; ПП – переключатель потока; ПФ – песочный фильтр; РУ – регулятор уровня; СБ – сопловой блок; СИ – тестируемое средство измерения; УФ – ультрафиолетовый стерилизатор; Ф – фильтр; ШУНР – распределительные шкафы управления насосами. Адаптировано из [11,16]

Fig. 2. Schematic diagram of the reference installation 3 GET 63–2019: АСУ – automated control system; АСИ – automated measurement system; БХ – storage tank; ВУ – weighing module; ДД – pressure meter; ДУ – level meter; ДТ – temperature meter; К – shut-off valves; КД – length compensator; КП – rubber anti-vibration compensator; КС – sewer drain; МР – water flow control module; Н – pump; НБ – pressure tank; ОВ – humidity meter; ОХЛ – refrigeration unit; ПП – flow switch; ПФ – sand filter; РУ – level controller; СБ – nozzle block; СИ – measuring instrument being tested; УФ – ultraviolet sterilizer; Ф – filter; ШУНР – pump control cabinets. Adapted from [11,16]

обеспечивается поддержанием постоянной величины абсолютного давления воздуха в воздушной подушке напорного бака модуля стабилизации и уровня жидкости в нем.

Постоянство уровня жидкости в напорном баке модуля стабилизации поддерживается автоматическим регулированием частоты вращения привода насосов Н3 – Н7 (рис. 2) модуля создания расхода на основе информации об измеренном значении текущего давления и скорости изменения уровня жидкости в напорном баке НБ (рис. 2). В качестве датчика уровня в эталоне используется датчик перепада давления Δp , который в условиях стабильной плотности воды в узком диапазоне температур рабочей жидкости с достаточной точностью отражает уровень жидкости в баке.

Процесс поддержания постоянного значения давления воздушной подушки в напорном баке осуществляется при его поступлении и стравливании через дискретный набор критических сопел, входящих в состав системы сброса К15 и наддува К16 (рис. 2).

Температура рабочей жидкости (воды) поддерживается в пределах $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ во всем диапазоне воспроизводимых расходов. Регулирование температуры рабочей жидкости обеспечивается автономной системой температурной стабилизации, состоящей из фреонового чиллера и сухой градирни. Контроль температуры рабочей жидкости ведется непосредственно в измерительной линии и баках модулей взвешивания.

Автоматизированная система управления АСУ предназначена для сбора и обработки измерительной информации, поступающей от весовых устройств, модуля регулирования расхода воды, поверяемых (калибруемых) средств измерений, 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.

Стабилизация значений давления в воздушной подушке и уровня жидкости в модуле стабилизации

Конструкция эталонной установки позволяет осуществлять контроль стабильности воспроизводимого расхода – контроль перепада давления на радиусных соплах модуля регулирования. Номенклатура открытых на определенном расходе сопел остается неизменной за все время воспроизведения расхода жидкости на данном режиме расхода жидкости, а точная регулировка расхода жидкости обеспечивается плавным изменением давления жидкости на входе радиусных сопел за счет изменения давления воздушной подушки в напорном баке модуля стабилизации. При этом давление жидкости на выходе радиусных сопел определяется постоянным уровнем гидродинамического давления столба жидкости и фактически является неизменной величиной.

В этих условиях изменение перепада давления на участке от модуля стабилизации до выходных сечений сопел полностью определяются колебаниями полного давления жидкости во входном сечении измерительной линии, которое представляет собой сумму абсолютного давления воздуха в воздушной подушке напорного бака и гидродинамического давления столба жидкости.

Используемые в модуле стабилизации критические сопла позволяют обеспечить постоянную величину пропускаемого объемного расхода воздуха при перепаде давления на соплах выше критического значения. Сопла с малым проходным сечением выполнены со ступенчатой расширяющейся частью. Каждое из сопел закрывается или открывается клапаном. Автоматическое управление клапанами осуществляется на основе информации о значении абсолютного давления воздуха в воздушной подушке напорного бака. Процесс стабилизации давления в воздушной подушке напорного бака является малоинерционным. Время запаздывания реакции на отклонение давления от заданного уровня складывается из постоянного времени измерения давления (не более 0,01 с), времени срабатывания клапанов управления (не более 0,02 с) и времени распространения возмущения от нагнетания/стравливания воздуха по объему подушки (не более 0,02 с).

Изменение расхода жидкости, как и его уровень в напорном баке модуля стабилизации обеспечивается регулированием частоты вращения привода центробежных насосов при помощи частотных преобразователей.

В качестве параметра стабилизации давления рассматривается отклонение текущего абсолютного давления в воздушной подушке напорного бака

от заданного значения. Ввиду того, что в процессе регулирования через критические сопла поступают незначительные (по сравнению с объемом воздуха в воздушной подушке) порции воздуха, а температура воды на определенном режиме работы поддерживается системой температурной стабилизации на постоянном уровне $T = const$, термодинамические процессы в воздушной подушке можно считать равновесными. Тогда массу газа в воздушной подушке напорного бака в каждый момент времени можно определить по формуле

$$m = \frac{P \cdot V}{R \cdot T}, \quad (1)$$

где m , V и T – масса, объем и температура воздуха в воздушной подушке бака соответственно; R – удельная газовая постоянная воздуха.

Из баланса массы воздуха с учетом изменения объема воздушной подушки при изменении уровня жидкости в напорном баке можно записать дифференциальное уравнение для давления воздуха в подушке:

$$\frac{dP_i}{d\tau} = \frac{R \cdot T}{V_0 - F_0 \cdot (h - h_0)} \cdot q_{ma} - \frac{P}{V_0 - F_0 \cdot (h - h_0)} \cdot F_0 \frac{dh}{d\tau}, \quad (2)$$

где q_{ma} – массовый расход воздуха, поступающего в воздушную подушку напорного бака или удаляемого из нее; V_0 – номинальный объем воздушной подушки; h_0 и h – номинальный и действительный уровень жидкости в напорном баке соответственно; F_0 – номинальная площадь раздела фаз (зеркала воды) в баке.

Так как площадь раздела фаз мало изменяется в окрестности номинального уровня жидкости в напорном баке, $F_0 = const$.

Перепад давления на критических соплах, используемых для дозированной подачи и удаления сжатого воздуха в воздушную подушку напорного бака, всегда достаточен для критического режима истечения. Поэтому массовый расход воздуха $q_{ma} = q_{ma1}$, поступающего в напорный бак, и массовый расход воздуха $q_{ma} = q_{ma2}$, удаляемого из воздушной подушки напорного бака, определяется по методике [16].

Входящий в (2) уровень жидкости в напорном баке h определяется на основе баланса объемного расхода жидкости, поступающей в модуль стабилизации q_{vx} , и объемного расхода жидкости из модуля стабилизации в измерительную линию q_{vc} :

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{q_{vx} - q_{vc}}{F}, \quad (3)$$

где F – текущее значение площади свободной поверхности жидкости в напорном баке.

Значения расхода q_{vx} , которое обеспечивает центробежный насос при изменении частоты вращения вала привода, и напора H_x , создаваемого насосом при этом значении расхода, определяется при помощи уравнений подобия [17]:

$$q_{vx}/q_{vn} = n_x/n_n, \quad (4)$$

$$H_x/H_n = (n_x/n_n)^2. \quad (5)$$

Здесь q_{vn} – значение объемного расхода, соответствующее напору H_n ; q_{vx} – текущее значение объемного расхода; H_x – текущий напор, создаваемый насосом; n_n – частота вращения вала привода насоса, соответствующая расходу q_{vn} при напоре H_n ; n_x – текущая частота вращения вала привода насоса.

Величины q_{vn} и n_n определяются расходно-напорными характеристиками соответствующих насосов из состава модуля создания расхода.

Таким образом, система двух дифференциальных уравнений (2) и (3) описывает связь регулируемых параметров (P и h) с параметрами установки. Поэтому стабилизация давления воздушной подушки и уровня жидкости в напорном баке модуля стабилизации фактически обеспечивается контролем нагнетания/стравливания воздуха и регулированием частоты вращения приводов насосов.

При автоматическом управлении установкой эти уравнения используются для оценки скорости изменения давления в воздушной подушке на нагнетание/стравливание сжатого воздуха, а также для построения алгоритмов управления насосами и блоком переключения критических сопел, включая алгоритм определения необходимого текущего количества эквивалентных критических сопел на выпуск или выпуск воздуха.

Результаты экспериментальных исследований

При создании эталонной установки, которое проводилось в рамках совершенствования ГЭТ 63–2019, были выполнены экспериментальные исследования предложенной системы стабилизации, и они показали ее высокую эффективность.

Изменения мгновенных значений абсолютного давления P в воздушной подушке и уровня жидкости h в напорном баке модуля стабилизации при заданных

значениях абсолютного давления $P_0 = 1,1$ МПа и уровня жидкости $h_0 = 0,816$ м представлены на рис. 3а и рис. 3б соответственно.

$$h_0 = \Delta p_0 / (\rho \cdot g), \quad (6)$$

где Δp_0 – давление столба жидкости в баке, соответствующее h_0 ; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

При проведении исследований применялись: преобразователь давления измерительный РАА-33Х² с верхним пределом измерений 16 бар и пределами допустимой основной приведенной погрешности $\pm 0,05\%$ от ВПИ; датчик давления Метран – 150 CD³ с верхним пределом измерений 10 кПа и пределами допустимой основной приведенной погрешности $\pm 0,075\%$ от ВПИ.

Средние величины абсолютного давления и уровня жидкости в напорном баке соответствуют заданным значениям (рис. 3): колебания давления в воздушной подушке напорного бака носят относительно высокочастотный характер и хорошо отрабатываются системой стабилизации.

Стабильность напора на входе в измерительную линию характеризуются стандартными отклонениями абсолютного давления в воздушной подушке и уровня жидкости в баке от заданных значений P_0 и h_0 соответственно. Представленным на рис. 3 данным соответствуют отклонения мгновенных величин абсолютного давления ΔP в воздушной подушке напорного бака $\sigma \Delta P = 0,259$ кПа и отклонения давления столба жидкости $\rho g \Delta h$ в баке $\sigma_{\Delta h} = 0,00218$ кПа от заданных значений соответствующего параметра. Здесь $\Delta h = h - h_0$. Отклонения нормируются по перепаду давления, которым определяется расход жидкости через измерительную линию. Поскольку номинальные уровни жидкости в напорном баке модуля стабилизации и выходного сечения переключателя потока в конструкции эталона практически совпадают, расход жидкости при заданной номенклатуре включенных в работу радиусных сопел модуля регулирования определяется разностью полного давления воды в измерительной линии P^* эталона и атмосферного (барометрического) давления P_b . Полное давление P^* представляет собой сумму абсолютного давления в воздушной подушке напорного бака и гидростатического давления отклонения столба жидкости в напорном баке от номинального уровня. Поэтому закономерно отклонения мгновенных величин давления в воздушной подушке напорного бака

² Регистрационный номер в ФИФ ОЕИ 49250–16.

³ Регистрационный номер в ФИФ ОЕИ 32854–13.

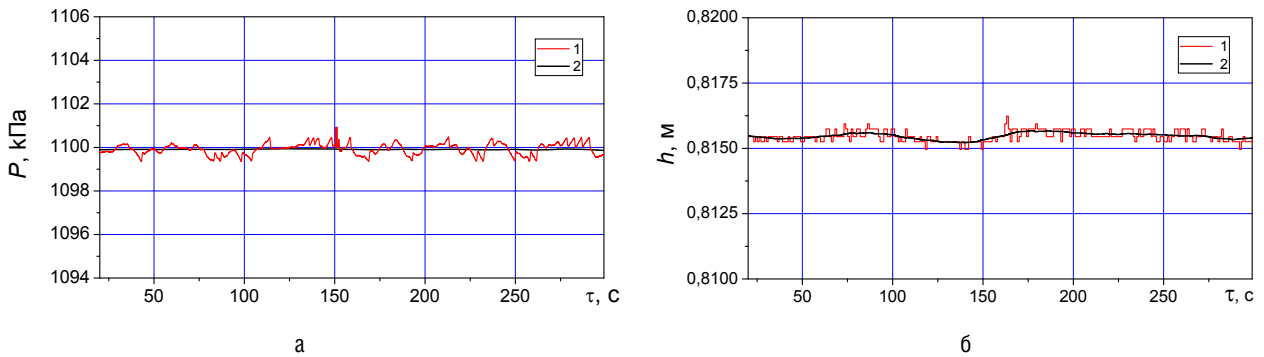


Рис. 3. Осциллограммы: а – изменение абсолютного давления в воздушной подушке; б – уровень жидкости в напорном баке модуля стабилизации: 1 – мгновенные значения; 2 – усредненные на скользящем интервале времени измерений 5–7 секунд
 Fig. 3. Oscillograms: а – change in absolute pressure in the air cushion; б – liquid level in the pressure tank of the stabilization module: 1 – instantaneous values; 2 – averaged over a sliding measurement time interval of 5–7 seconds

ΔP и давления столба жидкости в нем $\rho g \Delta h$ от заданных (стабилизируемых) значений нормировать по разности $P^* - P_b$.

Стоит отметить, что при проведении передачи единиц величин от ГЭТ 63–2019 вторичным, рабочим эталонам и средствам измерений практическое значение имеет величина среднего значения расхода, воспроизводимого эталонной установкой.

В качестве характерного времени усреднения был задан временной интервал $\Delta \tau = 57$ с (время заполнения бака модуля взвешивания на максимальном расходе).

Давление в воздушной подушке напорного бака $\delta_{\Delta P} = \Delta P / (P^* - P_b)$ и давление столба жидкости в напорном баке $\delta_{\Delta h} = \rho g \Delta h / (P^* - P_b)$ приведены в зависимости от интервала времени усреднения $\Delta \tau$ при номинальном значении абсолютного давления в воздушной подушке $P = 1,1$ МПа (см. рис. 4).

Осциллограммы давления в воздушной подушке напорного бака и уровня воды в нем, усредненных на интервале $\Delta \tau = 57$ с, показаны на рис. 3а и 3б соответственно (кривые 2).

Используя значения относительных отклонений величины давления в воздушной подушке напорного бака $\delta_{\Delta P}$ и давления столба жидкости в баке $\delta_{\Delta h}$, можно оценить относительное отклонение расхода δq_v от его среднего значения.

Для оценки можно принять, что величина расхода пропорциональна корню квадратному из перепада давления, поскольку падение давления в основном сосредоточено на радиусных соплах расходного блока эталонной установки, для которого это соотношение выполняется достаточно строго, а роль поверяемого средства измерения с предвключенным и поствключенным участками в общем гидравлическом

сопротивлении сравнительно мала. Тогда относительное отклонение среднего расхода жидкости от заданного значения может быть оценена при помощи выражения:

$$\delta q_{vx} = [0,25 \cdot (\delta_{\Delta P}^2 + \delta_{\Delta h}^2)]^{1/2}. \quad (7)$$

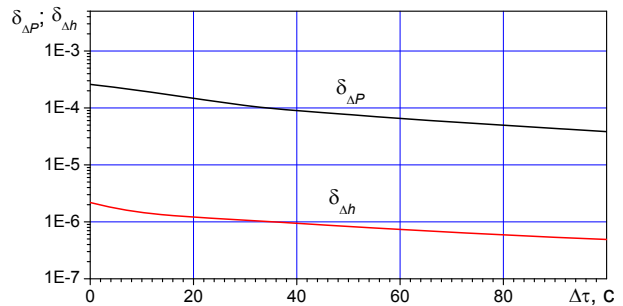


Рис. 4. Зависимость относительного отклонения средней величины давления в воздушной подушке напорного бака и давления столба жидкости в напорном баке от интервала усреднения

Fig.4. Dependence of the relative deviation of the average pressure in the air cushion of the pressure tank and the pressure of the liquid column in the pressure tank on the averaging interval

Оценки показали, что на установившемся режиме работы эталона относительное отклонение мгновенного расхода составляет $\delta q_v = 0,013\%$, а отклонение расхода при его усреднении на интервале $\Delta \tau = 57$ с не превышает $0,00336\%$ от его среднего значения.

Пользуясь представленными на рис. 4 зависимостями, можно оценить отклонение δq_v от заданного значения при любом характерном для данного режима поверки (калибровки) интервале времени осреднения $\Delta \tau$.

Заключение

Приведенные расчеты убедительно доказывают преимущества метода активного демпфирования колебаний давления и расхода жидкости, впервые реализованного при создании эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019. Высокая эффективность новаторского метода стабилизации абсолютного давления и расхода жидкости в напорном трубопроводе и измерительной линии эталонной установки 3 ГЭТ 63–2019 подтверждена экспериментально.

Конструктивными особенностями данного метода является то, что в водяной тракт установки включен напорный бак с оригинальной геометрией проточной части. Напорный бак заполнен жидкостью с заданным значением уровня свободной поверхности, над которой создается воздушная подушка с автоматическим поддержанием в ней заданного значения абсолютного давления. При выполнении данных условий обеспечивается низкий уровень амплитуды пульсаций на частоте колебаний давления и расхода жидкости.

Данное конструктивное решение активного демпфера позволяет исключить необходимость размещения

напорного бака на большую высоту над уровнем земли. При этом обеспечивается поддержание высоких значений (до 1,1 МПа) абсолютного давления в напорном трубопроводе и измерительной линии эталона.

Инженерное решение, лежащее в основе метода, еще предстоит оценить в научных кругах. В перспективе возможно изучить возможность расширения сферы применения данного метода.

Благодарности: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Acknowledgments: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

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

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Engel R. Modeling the uncertainty in liquid flowmeter calibration and application – Requirements and their technical realization for PTB's national water flow standard // Proceedings 13th International Conference SENSOR, Nürnberg, Germany, 22–24 May 2007 / Nürnberg, Germany: PTB, 2007. Vol.2. P. B8.6.
2. Engel R., Baade H. J. Model-based flow diverter analysis for an improved uncertainty determination in liquid flow calibration facilities // Measurement Science and Technology. 2010. Vol. 21, № 2. P. 025401. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/2/025401>
3. Pöschel W., Engel R. The concept of a new primary standard for liquid flow measurement at PTB Braunschweig // Proceedings 9th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO '98, Lund, Sweden, 15–17 June 1998. P. 7–12.
4. Guelich J. F., Bolleter U. Pressure pulsations in centrifugal pumps // Journal of Vibration and Acoustics. 1992. Vol. 114, № 2. P. 272–279. <https://doi.org/10.1115/1.2930257>
5. Dai C., Kong F., Dong L. Pressure fluctuation and its influencing factors in circulating water pump // Journal of Central South University. 2013. Vol. 20, № 1. P. 149–155. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1470-6>
6. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для вузов / Т. М. Башта [и др.]. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.
7. Singh P. J., Chaplis W. K. Experimental evaluation of bladder type pulsation dampeners for reciprocating pumps // Proceedings 7th International Pump Users Symposium, Texas A&M University, 1990. P. 39–47.
8. Development of optimal diaphragm-based pulsation damper structure for high-pressure GDI pump systems through design of experiments / J. Kim [et al.] // Mechatronics. 2013. Vol. 23, № 3. P. 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.02.001>
9. Wachel J. C., Price S. M. Understanding how pulsation accumulators work // Proceedings of the ASME 11th Annual Energy-Sources Technology Conference. 1988. P. 23–31.
10. Vetter G., Seidl B. Pressure pulsation dampening methods for reciprocating pumps // Proceedings of the 10th International Pump Users Symposium, Houston, Texas. 1993. Vol. 19. P. 25–39.
11. Тухватуллин А. Р., Щелчков А. В., Фафурин В. А. Государственный первичный специальный эталон единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости ГЭТ 63–2019 // Измерительная техника. 2021. № 2. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-3-8>
12. Miller J. E. Liquid dynamics of reciprocating pumps. Part 2. Pulsation-control devices and techniques // Oil & Gas Journal. 1983. Vol. 81, № 18.
13. Mc-Entee L. B. J. Oscillating diaphragms // Proceedings of the international conference on modeling and simulation of microsystems. 1999. Vol. 2. P. 597–600.
14. Sewall J. L., Wineman D. A., Herr R. W. An investigation of hydraulic-line resonance and its attenuation // NASA TM X-2787. 1973. P. 80.
15. Радиусные сопла для бескавитационного истечения воды при высоких перепадах давления / Д. В. Кратиров [и др.] // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 37–39.

16. Тухватуллин, А. Р. Государственный первичный специальный эталон единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости ГЭТ 63–2019 // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Международная молодежная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева-КАИ, Казань, 10–11 ноября 2021 года. Том IV. Казань: Изд-во ИП Сагиева А. Р., 2021. С. 211–217.

REFERENCE:

1. Engel R. Modeling the uncertainty in liquid flowmeter calibration and application – Requirements and their technical realization for PTB's national water flow standard. In: *Proceedings 13th International Conference SENSOR*, 22–24 May 2007, Nürnberg, Germany. Nürnberg, Germany: PTB; 2007. Vol.2. P. B8.6.
2. Engel R., Baade H. J. Model-based flow diverter analysis for an improved uncertainty determination in liquid flow calibration facilities. *Measurement Science and Technology*. 2010;21(2):025401. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/2/025401>
3. Pöschel W., Engel R. The concept of a new primary standard for liquid flow measurement at PTB Braunschweig. In: *Proceedings 9th International Conference on Flow Measurement FLOMEKO '98*, 15–17 June 1998, Lund, Sweden. Lund, Sweden: 1998, P. 7–12.
4. Guelich J. F., Bolleter U. Pressure pulsations in centrifugal pumps. *Journal of Vibration and Acoustics*. 1992;114(2):272–279. <https://doi.org/10.1115/1.2930257>
5. Dai C., Kong F., Dong L. Pressure fluctuation and its influencing factors in circulating water pump. *Journal of Central South University*. 2013;20(1):149–155. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1470-6>
6. Bashta M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. *Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives*. Moscow: Mashinostroenie; 1982. 423 p. (In Russ.).
7. Singh P. J., Chaplis W. K. Experimental evaluation of bladder type pulsation dampeners for reciprocating pumps. In: *Proceedings 7th International Pump Users Symposium*, Texas A&M University, 1990. P. 39–47.
8. Kim J., Yoon G. H., Noh J., Lee J., Kim K., Park H. et al. Development of optimal diaphragm-based pulsation damper structure for high-pressure GDI pump systems through design of experiments. *Mechatronics*. 2013;23(3):369–380. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.02.001>
9. Wachel J. C., Price S. M. Understanding how pulsation accumulators work. In: *Proceedings of the ASME 11th Annual Energy-Sources Technology Conference*. 1988; 23–31.
10. Vetter G., Seidl B. Pressure pulsation dampening methods for reciprocating pumps. In: *Proceedings of the 10th International Pump Users Symposium*, Houston, Texas. 1993. Vol. 19. P. 25–39.
11. Tukhvatullin A. R., Shchelchikov A. V., Fafurin V. A. 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. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2021;(2):3–8. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-2-3-01>
12. Miller J. E. Liquid dynamics of reciprocating pumps. Part 2. Pulsation-control devices and techniques. *Oil & Gas Journal*. 1983;81(18).
13. Mc-Entee L. B. J. Oscillating diaphragms. In: *Proceedings of the international conference on modeling and simulation of microsystems*. 1999. Vol. 2. P. 597–600.
14. Sewall J. L., Wineman D. A., Herr R. W. An investigation of hydraulic-line resonance and its attenuation. NASA TM X-2787. 1973. P. 80.
15. Kratirov D. V., Mikheev N. I., Molochnikov V. M., Saushin I. I., Tukhvatullin A. R., Fafurin V. A. Radial nozzles for non-cavitating flow of water at high pressure drops. *Measurement Techniques*. 2017;60(9):912–915. (In Russ.).
16. Tukhvatullin A. R. State primary special standard of units of mass and volume of liquid in a stream, mass and volumetric flow rates of liquid. In: *International youth scientific conference dedicated to the 60th anniversary of the first human flight into outer space and the 90th anniversary of the Kazan National Research Technical University*, 10–11 November 2021. Kazan: Vol. IV. Kazan: Sagieva A. R.; 2021. Vol. IV. P. 211–217. (In Russ.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ISO 9300:2022 Measurement of gas flow by means of critical flow nozzles // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/77401.html> (Accessed: 04.04.2023).

ГЭТ 63–2019 Государственный первичный специальный эталон единиц массы и объема жидкости в потоке, массового и объемного расходов жидкости / Институт-хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Текст : электронный // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. 2019. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1365156> (дата обращения: 04.04.2023).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Тухватуллин Альберт Рашидович – старший научный сотрудник отдела метрологического обеспечения средств и систем измерений расхода и количества жидкости ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»

Россия, 420088, Республика Татарстан, г. Казань,

ул. 2-я Азинская, д. 7а

e-mail: vniir-etalon@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7250-3246>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Al'bert R. Tukhvatullin – Senior Researcher of the Department of Metrological Support of Means and Systems for Measuring Flow and Quantity of Liquid, VNIIR – Affiliated Branch of D. I. Mendeleev Institute for Metrology

7 a, st. 2nd Azinskaya, Kazan, 420088, Russia

e-mail: vniir-etalon@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7250-3246>