

Оптимизация процесса воспроизведения единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости поверочной установкой с весовыми устройствами

Р. А. Корнеев¹, А. Р. Тухватуллин¹, В. А. Фафурин¹, Р. Р. Нигматуллин¹, А. В. Щелчков^{1,2}

¹Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии, Казань, Республика Татарстан, Россия, e-mail: rak_1985@mail.ru, vniir-etalon@bk.ru, fafurin.viktor@yandex.ru, runi85@mail.ru

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ, Казань, Республика Татарстан, Россия, e-mail: avschelchikov@kai.ru

Представлен экспериментальный способ определения минимального интервала времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью при воспроизведении единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости установкой поверочной с весовым устройством. Экспериментальные исследования выполнены в широком диапазоне массового расхода 11,10–83,26 кг/с (40–300 т/ч) при многократном статическом взвешивании рабочей жидкости. Переключатель потока выполнен с фиксированной геометрией проточной части среза сопла, что характерно для большого количества находящихся в эксплуатации в нашей стране установок поверочных с весовыми устройствами. Полученные по результатам исследований графические зависимости массового расхода от времени заполнения накопительной ёмкости являются базисом оптимизации процесса воспроизведения единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости установок поверочных с весовыми устройствами. Данные графические зависимости позволили сформировать рекомендации по обоснованному выбору минимального интервала времени заполнения рабочей жидкостью накопительной ёмкости в исследованном диапазоне массового расхода. Оптимизация апробирована и может быть распространена на установки поверочные с весовыми устройствами от различных изготовителей с индивидуальными конструктивными и режимными параметрами.

Ключевые слова: переключатель потока, сопло, весовое устройство, массовый расход жидкости, интервал времени, бюджет неопределённости.

Введение. В различных отраслях промышленности для измерения расхода рабочей жидкости применяют расходомеры-счётчики (счётчики, преобразователи, расходомеры и т. д.). Процесс эксплуатации расходомеров-счётчиков сопровождается периодической поверкой в целях подтверждения соответствия средств измерений (СИ) метрологическим требованиям, указанным в описании типа на конкретное СИ. Подтверждение заявленных метрологических характеристик СИ – расхода рабочей жидкости – реализуется на поверочных установках согласно Государственной поверочной схеме для средств измерений массы и объёма жидкости в потоке, объёма жидкости и вместимости при статических измерениях, массового и объёмного расходов жидкости, утверждённой Приказом Росстандарта от 7 февраля 2018 г. № 256. Наибольшее распространение в Российской Федерации получили поверочные установки с весовыми устройствами, построенные на принципе статического измерения массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости. На этом же принципе построены национальные эталоны единиц расхода жидкости России, Германии, Румынии, Украины и других стран [1]. Бюджет неопределённости поверочной установки

включает в себя неопределённости измерений, обусловленные работой весового устройства, определением интервала времени измерений, плотностей рабочей жидкости и воздуха. Следует отметить, что значительное влияние на бюджет неопределённости поверочных установок оказывают неопределённости измерений, обусловленные функционированием переключателя потока [2–6].

Передача СИ единиц массового Q_M и объёмного Q_V расходов рабочей жидкости поверочными установками с весовыми устройствами осуществляется согласно уравнениям измерений соответственно

$$Q_M = \frac{M_{\text{изм}} \rho_{\text{ж. а}}}{\tau(\rho_{\text{ж. а}} - \rho_{\text{в}})}, \quad (1)$$

$$Q_V = \frac{M_{\text{изм}} \rho_{\text{ж. а}}}{\tau(\rho_{\text{ж. а}} - \rho_{\text{в}}) \rho_{\text{ж}}},$$

где $M_{\text{изм}}$ – масса рабочей жидкости по показаниям весоизмерительного устройства; $\rho_{\text{ж. а}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность рабочей жидкости соответственно при атмосферном давлении и избыточном давлении в трубопроводе; $\rho_{\text{в}}$ – плотность

окружающей среды (воздуха); τ – время заполнения накопительной ёмкости.

Согласно рекомендациям международного стандарта ISO 4185 «Measurement of liquid flow in closed conduits. Weighing method» и ГОСТ Р 8.909-2016 «ГСИ. Вторичные эталоны единиц массового и объемного расходов, массы и объема жидкости. Основные метрологические и технические требования» время τ заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью при максимальном расходе составляет более 30 с. Накопительная ёмкость, в которую в течение каждого интервала времени τ измерения направляется рабочая жидкость, должна иметь достаточный объём, чтобы погрешность определения времени была незначительной. Необходимо обратить внимание, что в международном стандарте ISO 4185 описаны мероприятия, позволяющие сократить интервал времени измерения при сохранении требуемой точности измерения. Реализация данных мероприятий, позволяет скорректировать положение промежуточных датчиков, установленных на исполнительном механизме переключателя потока, который перемещает подвижную часть переключателя потока в прямом и обратном направлениях. Это, в свою очередь, позволяет лишь внести поправку в определение интервала времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью, но не обосновывает сокращение интервала времени заполнения накопительной ёмкости менее 30 с при сохранении требуемой точности измерений единиц расхода рабочей жидкости. Недостаточный объём накопительной ёмкости весоизмерительного устройства в некоторых поверочных установках является причиной малого (значительно меньше 30 с) интервала времени заполнения при максимальном расходе. Осуществление мероприятий из ISO 4185 не представляется возможным на большинстве поверочных установок, находящихся в эксплуатации на территории Российской Федерации, потому что данный режим работы не заложен изготовителем в алгоритм работы программного обеспечения установок. Возникает вопрос, о существовании или отсутствии зависимости минимального интервала времени заполнения накопительной ёмкости от расхода рабочей жидкости вида $\tau_{\min} = f(\bar{Q}_M)$.

Цель данной статьи – оценка минимального интервала времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью во всём диапазоне расходов при фиксированной геометрии сопла переключателя потока поверочной установки. Стоит отметить, что каждый переключатель потока имеет индивидуальные конструктивные особенности.

Метод определения временного интервала. Оценка минимального интервала времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью в диапазоне массового расхода $\bar{Q}_M \in 11,10 \dots 83,26$ кг/с (40–300 т/ч) при фиксированной геометрии сопла переключателя потока производилась на поверочной установке, предназначенной для воспроизведения единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости. Геометрические характеристики среза сопла переключателя потока составляют $l_c \times b_c = 0,792 \times 0,035$ м (где l_c – длина среза сопла,

b_c – ширина среза сопла) [5]. Для рассматриваемого переключателя потока время перемещения подвижной части в прямом направлении больше времени перемещения в обратном направлении.

Гидравлическая система поверочной установки выполнена в виде разомкнутого контура с принудительной системой подачи рабочей жидкости переключателем потока из бака-хранилища на весовое устройство. Гидравлический тракт эталона выполнен из нержавеющей стали во избежание коррозии. В качестве рабочей жидкости применяется вода питьевая по СанПиН 2.1.4.1074.

Система измерения массы рабочей жидкости состоит из платформенных весов с установленной на них накопительной ёмкостью. Максимальный предел взвешивания весового устройства 6000 кг, что позволяет заполнить весь объём накопительной ёмкости (4 м³) рабочей жидкостью при максимальном расходе за 48 с и, соответственно, при минимальном расходе – за 360 с.

Система создания потока рабочей жидкости состоит из блока центробежных насосов, подключённых параллельно к общему выходному коллектору. Счётчики-расходомеры обеспечивают настройку на заданный расход Q_3 рабочей жидкости посредством обратной связи с частотными регуляторами и системой пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования. Максимальное относительное отклонение от заданного массового расхода рабочей жидкости в исследованном диапазоне расходов составляет $\delta(Q_3) = \pm 0,1\%$. Данное обстоятельство позволяет при многократных измерениях ($n \geq 11$) получать на весовом устройстве отклонение от среднего значения измеренной массы рабочей жидкости $\Delta M_{\text{изм}} = -M_{\text{изм}i} = \pm 0,8$ кг для массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с и, соответственно, $\Delta M_{\text{изм}} = \pm 0,4$ кг для массового расхода $\bar{Q}_M = 11,1$ кг/с. Среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов многократных измерений массы рабочей жидкости $S_{M_{\text{изм}}} \leq 3,4 \cdot 10^{-3} \%$ для массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с, соответственно $S_{M_{\text{изм}}} \leq 2,5 \cdot 10^{-3} \%$ для $\bar{Q}_M = 11,1$ кг/с.

Измерительный контроллер поверочной установки позволяет формировать многократно ($n \geq 11$) интервалы времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью с максимальным отклонением от среднего значения $\Delta \tau = \bar{\tau} - \tau_i = \pm 7 \cdot 10^{-3}$ с для массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с, соответственно $\Delta \tau = \pm 2 \cdot 10^{-3}$ с для массового расхода $\bar{Q}_M = 11,1$ кг/с. СКО результатов многократных измерений интервалов времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью $S_{\tau} \leq 0,003\%$ для массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с, и $S_{\tau} \leq 0,005\%$ для $\bar{Q}_M = 11,1$ кг/с.

Пневмогидравлический стабилизатор снижает уровень пульсаций потока рабочей жидкости, исключает явление гидравлического удара. Система обеспечения условий выполнения измерений комплектуется элементами термостабилизации физико-химических параметров жидкости и окружающей среды. Общее управление, сбор и обработка информации осуществляются автоматизированной системой управления.

Анализ результатов исследования. Экспериментальные исследования выполнены для 8 фиксированных точек

(режимов) массового расхода $\bar{Q}_{Mj}$. Для оценки минимального времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью необходимо в каждой точке (режиме) массового расхода выбрать не менее 11 значений из интервала времени измерений τ_{ji} , в течение которого рабочая жидкость

поступает на весовое устройство. Таким образом, для каждого интервала времени производится не менее одиннадцати измерений ($n \geq 11$). Наименьшее значение τ_{ji} определяется как минимально воспроизводимый интервал времени программным обеспечением поверочной установки. Данное

значение априори характеризуется максимальными неопределённостями, обусловленными работой переключателя потока, в том числе нижним диапазоном чувствительности и дискретности весового устройства, но необходимо для построения графических зависимостей вида $\bar{\tau}_{ji} = f(\bar{Q}_{Mj})$ для каждой точки (режима) массового расхода. Далее на примере анализа графической зависимости для точки (режима) массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с (рисунок а) определяется минимальный интервал времени $\tau_{\min}$ заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью для каждой точки (режима) массового расхода.

Исходными данными для оценки $\tau_{\min}$ являются $\rho_{ж. а'}$, $M_{изм. j}$, ρ_B , τ .

Для одной из исследуемых точек (режимов) расхода определим средние арифметические значения основных величин уравнения измерения (1) – массы для n измерений по показаниям весового устройства $\bar{M}_{изм. j}$, интервала времени n измерений по показаниям канала времени $\bar{\tau}_j$, массового расхода для каждой точки (режима) $\bar{Q}_{Mj}$:

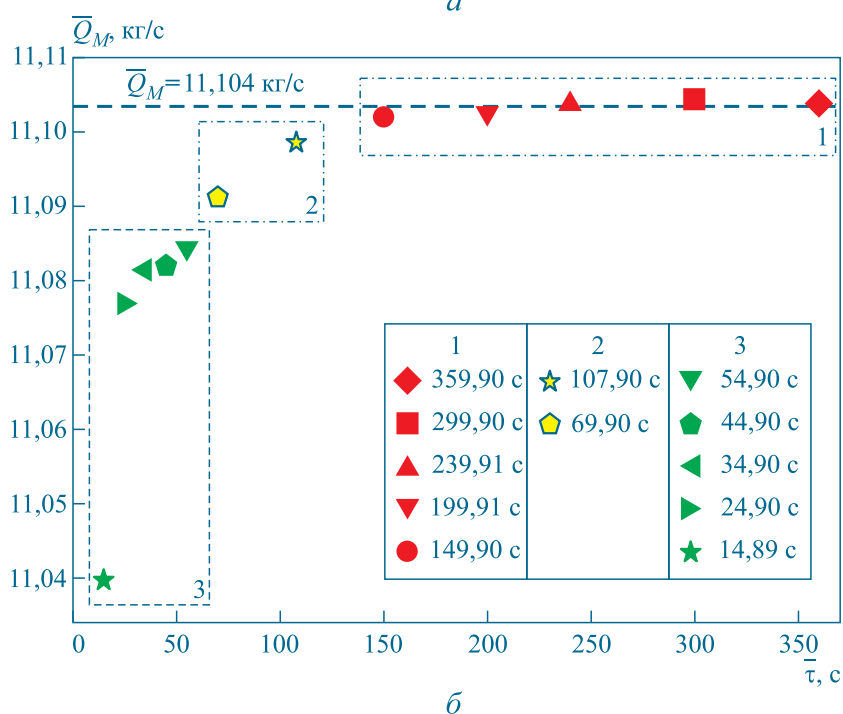
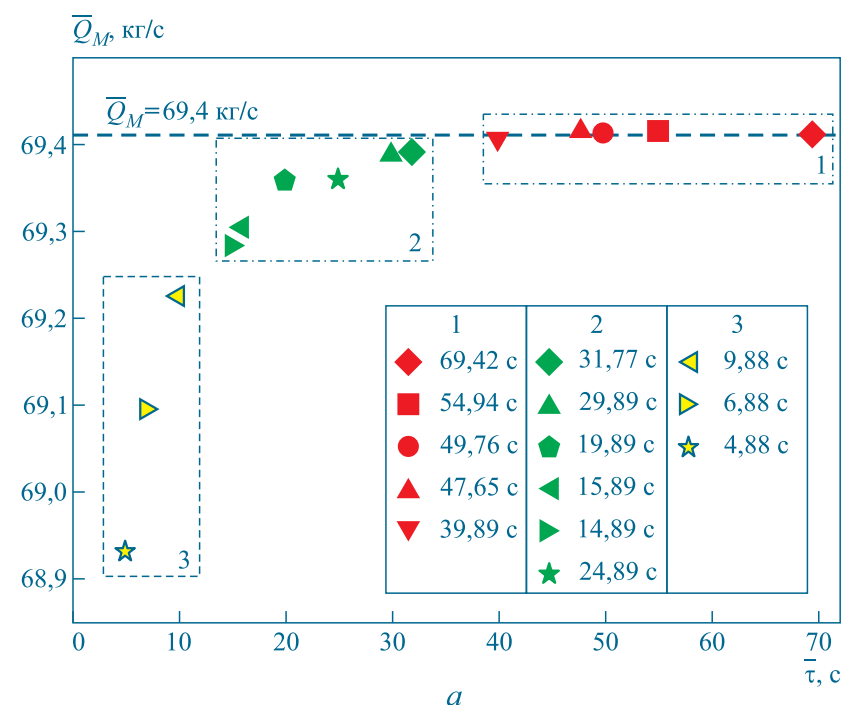
$$\bar{M}_{изм. j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{изм. ji};$$

$$\bar{\tau}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_{ji};$$

$$\bar{Q}_{Mj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{Mji},$$

где $M_{изм. ji}$ – масса рабочей жидкости по показаниям весового устройства; j, i – индексы серии измерений и точки взвешивания соответственно; τ_{ji} – значение интервала времени по показаниям канала времени; Q_{Mji} – значение массового расхода.

Графическая зависимость для точки (режима) массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с (см. рисунок а) вида $\bar{\tau}_{ji} = f(\bar{Q}_{Mj})$ позволяет визуально обосновать минимальный интервал времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью $\bar{\tau}_{\min} = 39,89$ с. Исследованные интервалы времени можно условно разделить на три группы точек. К группе 1 относятся точки (режимы) массового расхода, которые автомодельны от значений интервалов времени заполнения накопительной



Зависимость массового расхода $\bar{Q}_M$ от времени τ заполнения накопительной ёмкости: $\bar{Q}_M = 69,41$ и $11,1$ кг/с соответственно а, б

Dependence of mass flow rate $\bar{Q}_M$ on time τ filling storage capacity: $\bar{Q}_M = 69,41$ и $11,1$ kg/s respectively а, б

ёмкости рабочей жидкостью. Масса жидкости, попавшей в весовое устройство за интервалы времени прямого $\bar{\tau}_n = \text{const}$ и обратного $\bar{\tau}_{об} = \text{const}$ ходов, остаётся постоянной $\bar{M}_{п.о} = \text{const}$ и независимой от интервала времени измерений $\bar{\tau}_j$ и массы $\bar{M}_{изм\ j}$ по показаниям весового устройства. Найденное значение массового расхода для точек (режимов) группы 1 близко к истинному, так как масса жидкости $\bar{M}_{п.о} = \text{const}$ несопоставимо мала по сравнению с массой $\bar{M}_{изм\ 1}$, поступившей в накопительную ёмкость за интервал времени $\bar{\tau}_1$. Установлено, что дальнейшее увеличение интервала времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью $\bar{\tau}_1 > 39,89$ с нецелесообразно, так как это не приводит к улучшению метрологических характеристик, а временные затраты на проведения измерений увеличиваются. К группе 2 относятся точки (режимы) массового расхода в интервале времени заполнения накопительной ёмкости $\bar{\tau}_2 < \bar{\tau}_1 < 39,89$ с ($\bar{M}_{изм\ 2} < \bar{M}_{изм\ 1}$). Наблюдается отклонение значений точек группы 2 от истинного значения массового расхода $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с. Данное отклонение обусловлено уменьшением массы жидкости ($\bar{M}_{изм\ 2} < \bar{M}_{изм\ 1}$), попавшей в накопительную ёмкость весового устройства за меньший интервал времени измерений ($\bar{\tau}_2 < \bar{\tau}_1$), по отношению к массе жидкости $\bar{M}_{п.о} = \text{const}$ за интервалы времени прямого $\bar{\tau}_n = \text{const}$ и обратного $\bar{\tau}_{об} = \text{const}$ ходов. Следовательно, для ослабления данного влияния необходимо увеличить интервал времени заполнения накопительной ёмкости до $\bar{\tau}_1$. Максимальное отклонение массового расхода от истинного значения $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с обнаружено для точек группы 3, которая характеризуется ультракороткими интервалами времени заполнения накопительной ёмкости $\bar{\tau}_3 < \bar{\tau}_2 < \bar{\tau}_1$ рабочей жидкостью ($\bar{M}_{изм\ 3} < \bar{M}_{изм\ 2} < \bar{M}_{изм\ 1}$). Этот факт объясняется тем, что масса жидкости $\bar{M}_{п.о} = \text{const}$ за интервалы времени прямого $\bar{\tau}_n = \text{const}$ и обратного $\bar{\tau}_{об} = \text{const}$ ходов сопоставима с массой $\bar{M}_{изм\ 3} \ll \bar{M}_{изм\ 1}$, поступившей в накопительную ёмкость за ультракороткий интервал времени $\bar{\tau}_3 \ll \bar{\tau}_1$. Аналогично, можно сказать, что ультракороткие интервалы времени $\bar{\tau}_3 \ll \bar{\tau}_1$ сопоставимы с интервалами времени прямого $\bar{\tau}_n = \text{const}$ и обратного $\bar{\tau}_{об} = \text{const}$ ходов. Кроме того, для точек группы 3 значительный вклад вносит неопределённость, обусловленная нижним диапазоном чувствительности и дискретности весового устройства, определяемая как 10 % максимального предела взвешивания весового устройства.

Экспоненциальное распределение вида $\bar{\tau}_{ji} = f(\bar{Q}_{Mj})$ также наблюдается на графической зависимости (рисунок б) для минимальной точки (режима) расхода $\bar{Q}_M = 11,1$ кг/с при фиксированной геометрии среза сопла переключателя потока. Стоит обратить внимание, что минимальный интервал времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью значительно увеличился по сравнению с интервалом времени для $\bar{Q}_M = 69,41$ кг/с. Данная тенденция прослеживается во всём диапазоне расходов рассмотренного переключателя потока (таблица). Рост минимального интервала времени заполнения накопительной ёмкости рабочей жидкостью при уменьшении массового расхода $\bar{Q}_M$ объясняется индивидуальными функциональными особенностями переключателя потока, в том числе степенью

Интервалы времени заполнения рабочей жидкостью накопительной ёмкости

$\bar{Q}_{Mj}$, кг/с	$\bar{Q}_{Mj}$, т/ч	$\tau_{\min}$, с
11,10	40	149,9
27,82	100	85,19
38,88	140	69,89
44,49	160	50,89
55,58	200	44,88
69,41	250	39,89
83,26	300	32,88

заполнения и распределением скорости потока (профиля скорости потока) рабочей жидкости в срезе (плоскости) сопла [4, 5]. Следует отметить, что на оценку стандартной неопределённости измерений, обусловленную функционированием переключателя потока поверочной установки, также оказывают влияние следующие факторы: асинхронность сигналов старт–стоп между измерительным контроллером эталона и исследуемым расходомером; разновременность и неравномерность работы исполнительных устройств переключателя потока при прямом и обратном ходах; пульсации (нестабильность) расхода потока жидкости [6].

Заключение. Выполненная оптимизация процесса воспроизведения единиц массы и объёма жидкости в потоке, массового и объёмного расходов жидкости для поверочных установок с весовыми устройствами позволила сформировать рекомендации по обоснованному выбору минимального интервала времени заполнения рабочей жидкостью накопительной ёмкости в исследованном диапазоне массового расхода $\bar{Q}_M = 11,10 \dots 83,26$ кг/с (40–300 т/ч). Данные рекомендации (см. таблицу) позволят владельцам поверочной установки производить проверку средств измерений в рассмотренном диапазоне массового расхода при сохранении заявленных метрологических характеристик. Предложенная оптимизация прошла апробацию и может быть распространена на установки поверочные с весовыми устройствами различных изготовителей с индивидуальными конструктивными особенностями переключателей потока в широком диапазоне режимных параметров.

Список литературы

1. Косач Н. И. Оценка неопределённости измерений расхода жидкости на эталонах // Системы обработки информации. 2007. № 6 (64). С. 47–50.
2. Marfenko I. V., Yeh T. T., Wright J. D., *6th International Symposium for Fluid Flow*, Queretaro, Mexico, May 16–18, 2006, available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=831030 (accessed: 02.01.2020).
3. Shimada T., Oda S., Terao Y., Takamoto M., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, pp. 89–96. DOI: 10.1016/S0955-5986(03)00016-5
4. Rainer Engel, Hans Joachim Baade, *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: 02.01.2020).

5. Корнеев Р. А., Тухватуллин А. Р., Фафурин 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. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-4-42-47

6. Корнеев Р. А., Тухватуллин А. Р., Фафурин В. А., Миннуллин Р. Р., Щелчков А. В., Атаева А. И. Оценка стандартных неопределенностей измерений, вносимых переключателем потока в бюджет неопределенностей эталона // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 1. С. 42–47.

References

1. Kosach N. I., *Sistemy obrabotki informatsii*, 2007, no. 6 (64), pp. 47–50 (in Russian).
2. Marfenko I. V., Yeh T. T., Wright J. D., *6th International Symposium for Fluid Flow*, Queretaro, Mexico, May 16–18,

2006, available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=831030 (accessed: 02.01.2020).

3. Shimada T., Oda S., Terao Y., Takamoto M., *Flow Measurement and Instrumentation*, 2003, vol. 14, pp. 89–96. DOI: 10.1016/S0955-5986(03)00016-5

4. Rainer Engel, Hans Joachim Baade, *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: 02.01.2020).

5. Korneev R. A., Tukhvatullin A. R., Fafurin V. A., Shchelchikov A. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 347–353. DOI 10.1007/s11018-019-01628-8

6. Korneev R. A., Tukhvatullin A. R., Fafurin V. A., Shchelchikov A. V., Ataeva A. I., *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2019, no. 1, pp. 42–47 (in Russian).

Дата поступления: 13.06.2019.

Дата принятия: 05.11.2019.

Optimization of the process of reproducing units of mass and volume of liquid in a stream, mass and volumetric flow rates of liquid for calibration units with weighing devices

Roman A. Korneev¹, Albert R. Tukhvatullin¹, Viktor A. Fafurin¹, Ruslan R. Nigmatullin¹, Alexey V. Shchelchikov^{1,2}

¹All-Russian Research Institute of Flow Metering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, e-mail: rak_1985@mail.ru, vniir-etalon@bk.ru, fafurin.viktor@yandex.ru, runi85@mail.ru, avschelchikov@kai.ru

²Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, e-mail: avschelchikov@kai.ru

The publication presents an experimental method for estimating the minimum time interval for filling a storage tank with a working fluid with a fixed geometry of the nozzle of the flow switch of the calibration plant when playing units of mass and volume of fluid in the flow, mass and volumetric flow rates of the fluid. Experimental studies were performed in a wide range of mass flow rate 11, 10–83, 26 kg/s (40–300 t/h) with repeated static weighing of the working fluid. The flow switch is made with a fixed geometry of the flow part of the nozzle exit, which is typical for a large number of calibration units in use in our country with weighing devices. The graphical dependences of the mass flow rate on the time of filling the storage capacity obtained from the research results are the basis for optimizing the process of reproducing units of mass and volume of liquid in the flow, mass and volumetric flow rates of the liquid for calibration plants with weighing devices. These graphical dependencies made it possible to formulate recommendations on the reasonable choice of the minimum interval for filling the storage tank with working fluid in the studied range of mass flow rate. Optimization has been tested and can be extended to calibration units with weighing devices from various manufacturers with individual design and operating parameters.

Key words: diverter, nozzle, weighing device, mass flow of liquid, time interval, uncertainty budget.