УДК 681.121.8
DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0008

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАССОВОГО РАСХОДА ЖИДКОСТИ

© Авторы 2022

SPIN: 5378-0207
AuthorID: 644194
ORCID: 0000-0003-2197-6419
ГУДКОВА Екатерина Александровна, аспирант,
старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: gudkova-penza@yandex.ru)
SPIN: 6169-8590
AuthorID: 448228
ORCID: 0000-0002-1313-6826
ResearcherID: P-7345-2015
ScopusID: 55895350100
ТАРАНЦЕВА Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Биотехнология и техносферная безопасность»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: krtar2018@bk.ru)
SPIN: 9986-0973
AuthorID: 614496
ORCID: 0000-0002-2071-5404
ResearcherID: B-5784-2016
ScopusID: 7005080984
МИХЕЕВ Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, д. 1а/11, e-mail: mix1959@gmail.com)

Аннотация. Работа посвящена выявлению факторов, в наибольшей степени влияющих на точность измерения массового расхода жидкостей кориолисовыми расходомерами, и выбору способов снижения этого негативного воздействия. Выявлено, что в наибольшей степени на точность измерения оказывают гидродинамические режимы течения рабочей среды, которые при определенных числах Рейнольдса вызывают вторичные пульсации жидкости. Это приводит к тому, что измерительная трубка расходомера испытывает меньшее влияние силы Кориолиса, и как следствие показания прибора ниже, чем фактический массовый расход. Выявлено также, что помимо гидродинамического режима течения потока на точность прибора влияют температура и давление рабочей жидкости, температура окружающей среды и пульсации самого потока, вызванные резонансными колебаниями труб и трубопроводной арматуры. Показано, что для повышения точности расходомера необходима автоматическая компенсация влияния разности температур между окружающей средой и измеряемой жидкостью, так как ошибка в измерении температуры рабочей среды датчиком с внешней стенки расходомера не позволяет точно рассчитать плотность жидкости. Перепад давления рабочей среды может приводить к смещению нулевого значения кориолисова расходомера, что также требует автоматической подстройки. Пульсации потока вызывают ошибки кориолисовых расходомеров при измерении расхода на частотах, кратных собственной частоте расходомера, и требуют применения методов фильтрации для их устранения или снижения. Сделан вывод, что актуальной задачей является разработка методов автоматической компенсации воздействия описанных факторов.

Ключевые слова: кориолисов расходомер, факторы, точность измерения, пульсации потока, температура, давление, число Рейнольдса.

ANALYSIS OF CRITERIA AFFECTING THE ACCURACY OF MEASURING THE MASS FLOW OF LIQUID

© The Author(s) 2022

GUDKOVA Ekaterina Aleksandrovna, postgraduate student,
senior lecturer of the Department of Information Technologies and Systems
TARANTSEVA Klara Rustemovna, doctor of technical sciences, professor,
head of the department «Biotechnology and technosphere safety»
MIKHEEV Mikhail Yurievich, doctor of technical sciences, professor,

head of the department « Information Technologies and Systems »
Penza State Technological University
(440039, Russia, Penza, Baydukov passage/Gagarina Street, 1a/11,
e-mails: gudkova-penza@yandex.ru, krtar2018@bk.ru, mix1959@gmail.com)

Abstract. The work is devoted to the identification of factors that most affect the accuracy of measuring the mass flow of liquids with coriolis flowmeters and choosing ways to reduce this negative influence. It is revealed that the hydrodynamic flow regimes of the working medium have the greatest effect on the measurement accuracy, which, at certain Reynolds numbers, cause secondary pulsations of the liquid. This leads to the fact that the measuring tube of the flow meter experiences a reduced influence of the Coriolis force, and as a result, the readings of the device are lower than the actual mass flow. It was also revealed that in addition to the hydrodynamic flow regime, the accuracy of the device is affected by the temperature and pressure of the working fluid, ambient temperature and pulsations of the flow itself caused by resonant vibrations of pipes and pipe fittings. It is shown that in order to increase the accuracy of the flowmeter, automatic compensation of the influence of the temperature difference between the environment and the measured liquid is necessary, since an error in measuring the temperature of the working medium by a sensor from the outer wall of the flowmeter does not allow accurate calculation of the density of the liquid. The pressure drop of the working medium can lead to a shift of the zero value of the Coriolis flow meter, which also requires automatic adjustment. Flow pulsations cause errors of coriolis flowmeters when measuring flow at frequencies that are multiples of the natural frequency of the flowmeter, and require the use of filtration methods to eliminate or reduce them. It is concluded that an urgent task is to develop methods for automatic compensation of the effects of the described factors.

Keywords: coriolis flowmeter, factors, measurement accuracy, flow pulsations, temperature, pressure, Reynolds number.

Для цитирования: *Гудкова Е.А. Анализ критериев, влияющих на точность измерения массового расхода жидкости / Е.А. Гудкова, К.Р. Таранцева, М.Ю. Михеев// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 2(58). – С. 49-54. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0008.*

Введение. Точное измерение массового расхода текучих сред необходимо во многих отраслях промышленности – химической, нефтехимической, пищевой и других. Широкое применение кориолисова расходомера для этих целей обусловлено возможностью его непосредственного измерения массового расхода текучих сред и их плотности с высокой точностью. Однако на точность измерения влияет большое количество факторов, обусловленных как принципом измерения расхода жидкости в кориолисовом расходомере, так и различными процессами, протекающими в измеряемой жидкости и окружающей среде.

Кориолисов расходомер имеет одну или несколько измерительных трубок, зажатых с обоих концов. Источник колебаний, расположенный в середине измерительной трубки, передает вибрационное воздействие, с заданной амплитудой и частотой, в результате чего измерительная трубка имеет собственную (резонансную) частоту вибрации f_1. Как только в измерительной трубке начинает течь рабочая среда, на собственную вибрацию трубки начинает оказывать воздействие сила Кориолиса, приводящая к ассиметричной деформации левого и правого концов измерительной трубки. Деформация трубки приводит к разнице во времени Δt или фазе между ответными сигналами от двух датчиков, которые чаще всего устанавливаются симметрично относительно источника колебаний. Массовый расход определяют уравнением $q_m=K\times(\Delta t-\Delta t_0)$, где K – коэффициент калибровки расхода, связанный с чувствительностью измерения расхода кориолисовыми расходомерами, Δt_0 – временная задержка калибровки нулевого расхода [1]. В идеальных условиях K и Δt_0 постоянны, а массовый расход линейно пропорционален временной задержке Δt и не зависит от других параметров потока. Однако на практике на точность измерения массового расхода жидкости кориолисовыми расходомерами влияет большое количество факторов, обусловленных условиями проведения процесса измерения [1-8, 17-22] (пульсации потока, изменение фазового состава жидкости и др.), особенностями конструкции и сборки [1-3] (асимметричное демпфирование, условия монтажа и т.д.), внешними условиями эксплуатации [1-3, 9-16] (перепады давления, разница температур жидкости и окружающей среды и др.).

Учет взаимного влияния данных факторов при моделировании работы кориолисова расходомера позволит разрабатывать высокоточные точные модели для исследования и улучшения метрологических характеристик кориолисовых расходомеров.

Методология. *Целью* данной работы является выявление факторов, в наибольшей степени влияющих на точность измерения массового расхода кориолисовыми расходомерами, и выбор способов снижения этого негативного воздействия. В основу методики исследований заложен анализ физических процессов, происходящих в расходомере. Теоретическое обоснование вопросов, составляющих предмет исследования, базировалось на основных положениях теории гидродинамики и массопереноса. Сравнительный анализ влияния пульсаций потока, перепада температур рабочей жидкости и окружающей среды; а также давления жидкости и гидродинамических режимов её течения на точность измерения массового расхода

кориолисовыми расходомерами проводился на основе имеющихся в открытом доступе данных, полученных аналитическими и численными методами, а также экспериментальных результатов.

Результаты. Анализ имеющихся на сегодняшний день данных показал, что к основным факторам, оказывающим влияние на точность измерения массового расхода кориолисовыми расходомерами, относят пульсации потока, разницу температур рабочей жидкости и окружающей среды, давление жидкости и гидродинамические режимы потока, определяемые числом Рейнольдса. Ниже проанализированы эти факторы и предложены решения для компенсации их негативного влияния.

Влияние пульсации потока. В промышленных потоках существуют многочисленные источники, приводящие к пульсации жидкости, они вызваны работой различного оборудования (насосами, компрессорами и др.), приводящего к резонансным колебаниям труб и трубопроводной арматуры [2, 4-8].

Теоретически исследования вибраций трубы, с пульсирующим потоком жидкости, описаны Paidoussis в работе [4]. Авторы [2, 5-8] показали, что пульсации потока вызывают ошибки в измерениях среднего расхода жидкости.

Аналитическое решение, позволяющее учесть влияние пульсаций потока на массовый расход жидкости, представлено в работе Cheesewright и Clark [5].

Kazahaya [7] доказал, что погрешности измерения, вызваны не только внешней вибрацией, но также перепадом температуры и давления, и предложил методику их исправления.

Установлено [5-7], что кориолисовы расходомеры дают ошибочные показания массового расхода для пульсаций потока на частоте, совпадающей с собственной частотой расходомера f_1, и на частоте, представляющей собой сумму и разность частоты пульсаций (f_p) и собственной частоты расходомера – $f_p \pm f_1$, независимо от конструкции расходомера [5]. Фильтрация сигналов позволяет уменьшить или устранить эту проблему, однако, она неэффективна в случае, если частота пульсации f_p близка к f_1.

Svete и соавторы [2] теоретически и экспериментально исследовали влияние пульсации потока на точность измерения. Проведенный ими анализ ряда коммерчески доступных расходомеров, с различными геометрическими формами, показал, что пульсации потока влияют на работу расходомера в результате биения при его приводном движении. Экспериментальные исследования подтвердили, что в результате пульсации потока, возникают не только вышеуказанные вибрации, но и колебания измерительной трубки вследствие возбуждения на частоте пульсаций. Результаты проверки [2] точности кориолисовых расходомеров при наличии пульсаций потока показали, что даже при относительно одинаковых индуцированных пульсациях потока, средняя погрешность измерения массового расхода значительно отличается от одной модели расходомера к другой. Эта разница обусловлена различиями алгоритмов определения разности фаз между сигналами датчиков и методов коррекции поправочных коэффициентов у различных производителей расходомеров, представляющими коммерческую тайну.

Точность кориолисовых расходомеров ухудшается, когда частота вибрационных движений измерительной трубки, вызванных пульсациями потока, равна одной из собственных частот расходомера. Это представляет серьезную проблему для производителей расходомеров, поскольку увеличение собственных частот измерительной трубки для избегания влияний пульсации требует повышения ее жесткости [2].

Результаты исследований показали, что доминирующей причиной погрешностей кориолисовых расходомеров из-за пульсаций потока является возбуждение дополнительных вибраций измерительной трубки на частоте, соответствующей более высокой моде колебаний трубки f_2.

Авторами [5-7] предложены методы для определения разности фаз между сигналами датчиков кориолисовых расходомеров, позволяющие устранить влияние всех частотных составляющих, кроме близких к собственной частоте f_1.

В работе [2] рассмотрены ошибки калибровки кориолисовых расходомеров из-за пульсаций потока с частотами f_2 и $f_2 \pm f_1$.

Furuichi и соавторы [8] провели сравнительный анализ чувствительности кориолисовых, вихревых, турбинных, ультразвуковых, электромагнитных расходомеров к переменному расходу жидкости. Исследована реакция на внезапное повышение и резкое уменьшение скорости потока, реакция на частоту и амплитуду пульсации потока, оценено среднее значение расхода для различных расходомеров. Выявлено, что отклонение, вызванное пульсирующим потоком (как с низкой, так и с высокой частотой пульсации), у кориолисовых расходомеров намного меньше, чем у других испытанных расходомеров, что дает возможность использовать его в качестве эталонной системы измерения расхода [8].

Влияние температур жидкости и окружающей среды. При изменениях температур окружающей среды и измеряемой жидкости, а также при их резком перепаде, возможны ошибки кориолисовых расходомеров в расчетной плотности и определении массового расхода.

Известно, что плотность жидкости зависит от температуры. Для того, чтобы не допустить ошибок в определении массового расхода и расчетной плотности, производители расходомеров устанавливают на измерительной трубке датчик температуры. На основе значений измеряемой температуры вносятся корректировки в вычисляемые данные плотности и массового расхода рабочей жидкости. Также осуществляется подстройка частоты колебаний в соответствии с изменением плотности для поддержания

резонансной частоты измерительной трубки.

Если влияние температуры рабочей среды на точность кориолисовых расходомеров изучено достаточно хорошо и не требует дальнейшего рассмотрения, то влияние перепадов температур окружающей среды, разницы температур окружающей среды и измеряемой жидкости на показания прибора требуют дальнейшего изучения.

Модель, разработанная Costa и соавторами [9] позволяет скорректировать данные, измеренные кориолисовым расходомером, для учета влияния изменения температуры окружающей среды. Исследовались потоки с массовым расходом от 1 кг/с до 15 кг/с в диапазоне температур от 12°C до 45°C. Данные расчета согласуются с экспериментальными в пределах ± 0,08%. Если пренебречь модулем сдвига (в форме коэффициента Пуассона), погрешность измерения массового расхода по предложенной модели составляет до 0,24%.

MacDonald и соавторы [10] установили зависимость погрешности измерения кориолисовым расходомером от температуры в диапазоне от -40°C до 40°C. Выявлено, что если температура расходомера сильно отличается от температуры поступающей среды, ошибки могут составлять до 15% даже при низких расходах до 0,5 кг/мин.

В настоящее время, температура жидкости, поступающей в кориолисов расходомер, определяется с помощью датчика температуры, закрепленного на внешней стенке измерительной трубки. Таким образом датчик не находится в непосредственном контакте с рабочей жидкостью, и значение температуры, выдаваемое преобразователем расхода кориолисова расходомера, основано на измерении температуры стенки трубки.

Исследования [11] показали, что температура жидкости, согласно показаниям расходомера увеличилась с 19°C до 25,5°C, в то время как фактически температура жидкости увеличилась только с 19°C до 21,5°C. Временная задержка, в течение которой наблюдался дрейф из-за повышения температуры окружающего воздуха, составляла около пятнадцати минут. Разница между измеренной и фактической температурой жидкости объясняется эффектом теплопередачи через стенки трубки.

Результаты исследований Lindsay и соавторов [12] подтвердили ошибки кориолисова расходомера при определении расчетной плотности, вызванные разницей температуры окружающего воздуха и рабочей средой. По мере увеличения перепада температур между рабочей жидкостью и температурой окружающего воздуха погрешность возрастала.

Эти результаты также, как и предыдущие исследования [11], показывают, что в протестированных моделях температурной компенсации, присутствуют ограничения, вызывающие ошибки измерения в полевых условиях. Вызвано это тем, что, как правило, коэффициенты для калибровки плотности определяют на последней стадии изготовления расходомера. В качестве базовой жидкости используют воду с температурой 20°C [13]. Температура окружающего воздуха в тестируемых моделях не учитывается [11]. Это, а также отклонение свойств рабочей жидкости от свойств воды, приводят к возникновению ошибок при измерении на практике.

Таким образом, в измерительных системах, с изменяющимися внешними и внутренними факторами необходимо, чтобы расходомер динамически компенсировал эти влияния. Поэтому актуальной задачей является разработка методов автоматической компенсации воздействия температуры окружающего воздуха и рабочей среды во время работы расходомера.

Влияние давления жидкости. Влияние изменения давления жидкости в ходе технологического процесса проявляется в изменении погрешности кориолисова расходомера при определении расхода и плотности вследствие отличия давления измеряемой среды от давления при калибровке.

Авторы [3, 14-16] показали, что несмотря на то, что перепад давления жидкости напрямую не влияет на характеристики плотности, он может вызывать эффект смещения нуля, т.е. влиять на калибровку нулевого значения. Поскольку взаимосвязь между давлением и нулевым значением кориолисова расходомера сложно идентифицировать, на практике [16] рекомендуется проверка нулевого значения при рабочем давлении, а затем повторное обнуление, если значение не соответствует спецификации. Нулевое значение кориолисова расходомера следует периодически проверять на соответствие техническим характеристикам устройства. Следует использовать динамический коэффициент компенсации давления там, где это возможно. Другой способ – использовать коэффициент статической компенсации. Однако он не подходит для процессов со значительными колебаниями давления.

Влияние гидродинамических режимов течения жидкости. Работа кориолисовых расходомеров зависит от гидродинамики, а именно, структуры потока протекающего по трубе. Критерий Рейнольдса (*Re*), характеризующий гидродинамический режим, является мерой отношения сил инерции внутреннего трения в потоке. Потоки жидкости можно описать как находящиеся в одном из трех состояний: турбулентном ($Re>10000$), ламинарном ($Re<2300$) или переходном ($2300<Re<10000$).

Сужение диаметра расходомерной трубки и применение конструкций с различной формой трубок и степенью их шероховатости может вызвать возникновение вихрей (вторичных потоков жидкости) даже при малых значениях чисел Рейнольдса. Так, в наиболее распространенных расходомерах [1] со средними скоростями потока существуют ограничения, связанные с возникновением силы Кориолиса при ламинарном течении жидкости [17-22]. В ламинарном режиме создается вторичная осциллирующая поперечная сила, и часть силы Кориолиса тратится на преодоление этой вторичной

силы, в результате, вносится меньший вклад в создание фазового сдвига (т.е. запаздывания по времени) [17]. Следовательно, показания кориолисова расходомера оказываются ниже фактического массового расхода. С увеличением числа Рейнольдса толщина сдвигового слоя экспоненциально уменьшается и отношение силы сдвига к силе Кориолиса становится пренебрежимо малым.

Число Рейнольдса в измерительной трубке рассчитывается как: $Re = \frac{4m}{n_t \pi \mu d}$, где m – массовый расход, n_t – количество измерительных трубок, μ – динамическая вязкость, а d – внутренний диаметр измерительной трубки.

Для определения сдвига в отклике расходомера авторы [17] разделили составляющие уравнения Навье-Стокса на стационарную и осциллирующую части, а затем из осциллирующей составляющей получили следующее уравнение баланса импульса для колеблющегося потока:

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \left(\frac{\partial \rho u_j \overline{U_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_j \overline{U_j}}{\partial x_i}\right) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i}\delta_{ij} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i},$$

где $\frac{\partial \rho u_j \overline{U_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial \rho u_j \overline{U_j}}{\partial x_i}$ – член осциллирующей силы Кориолиса, $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i}$ – член осциллирующей поперечной силы.

Bobovnik и соавторы [17] изучили влияние профиля скорости на точность работы кориолисова расходомера с прямой трубкой для различных соотношений сторон и указали на заметную потерю чувствительности расходомера при низких числах Рейнольдса. Потеря точности при определении массового расхода составила около 8% при *Re=3000* для двух разных длин измерительной трубки ($\alpha=20$ и 40). Авторы [18] подтвердили, что их оценка согласуются с результатами теоретических расчетов.

Таким образом, потеря чувствительности кориолисова расходомера при низких числах Рейнольдса представляет серьезные проблемы при применении расходомеров данного типа.

Чувствительность расходомера $K=\Delta\varphi/q_m$, определяется как отношение между разностью приращением массового расхода $\Delta\varphi$ к величине массового расхода q_m:

$$q_m = \rho_0 \int_0^{R_i} V_{x0}(r) 2\pi r\, dr = \rho_0 V_0 \pi R_i^2,$$

где V_0 – средняя скорость потока.

Исходя из уравнения очевидно, что на чувствительность к массовому расходу влияет установившееся распределение скорости только в том случае, если весовая функция $W_x(r)$ изменяется с координатой r.

Моделирование выполнено для равномерно распределенного профиля скорости $Vx_0(r)=V_0$, для турбулентного профиля, задаваемого степенным законом:

$$V_{turb}(r) = V_0 \cdot \frac{60}{49}\left(1 - \frac{r}{R_i}\right)^{\frac{1}{7}}, Re \approx 10^5,$$

и, как предельный случай, ламинарного профиля, задаваемого параболическим законом:

$$V_{lam}(r) = V_0 \cdot 2\left(1 - \left(\frac{r}{R_i}\right)^2\right), Re < 2000.$$

Соответствующие значения чувствительности расходомера обозначены K_0, K_{turb} и K_{lam} соответственно.

В работе [18] чувствительность к массовому расходу представлена в виде отношения профиля, полученного для выбранной скорости, к равномерно распределенному профилю:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\int_0^{R_i} V_{x0}(r)\overline{W}_x(r)\, r\, dr}{V_0 \int_0^{R_i} \overline{W}_x(r)\, r\, dr}.$$

Анализ размерностей математической модели, используемой для вывода уравнения, показывает, что это отношение является функцией безразмерных характеристик:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{K}{K_0}\left(Re, n, \frac{L}{R}, j, \frac{s}{L}, \frac{h}{R}, \frac{\rho}{\rho_0}, v\right).$$

Kutin и др. [19] выполнили численный расчет двух различных гидродинамических режимов прямой измерительной трубки. Было обнаружено существенное отклонение в работе расходомера при малых *Re*. В ряде экспериментов указывается, что заметный рост показаний временной задержки, пропорциональной массовому расходу, наблюдается после *Re≈1300*, что соответствует ламинарному потоку жидкости.

Luo и Wu [20] обнаружили, что в случае ламинарного или нестационарного потока (*Re≈4000*), отклонение является флуктуирующим, в то время как в турбулентном потоке это отклонение незначительно.

Известно, что жидкости с разной вязкостью могут иметь разный коэффициент демпфирования [17]. Когда колебания структурной области затухают во время потока жидкости, источник колебаний должен возбуждать дополнительную силу, чтобы компенсировать потерю амплитуды, вызванную демпфированием жидкости. Поскольку демпфирование влияет на собственную частоту расходомерной трубки, коэффициент расхода изменяется, что напрямую влияет на массовый расход. Эффект снижения собственной частоты вызван взаимодействием между жидкостью и стенками трубки расходомера. В связи с этим необходимо учитывать демпфирующий эффект.

Vikram и соавторы [21] оценили производительность кориолисовых расходомеров с различными конфигурациями трубок, а также исследовали влияние таких факторов, как местоположения датчиков, амплитуды и частоты вибрации, на временную задержку в режиме ламинарного потока. Выявлено, что наиболее заметный рост показаний временной задержки наблюдался при *Re≈1300*.

Обсуждение. Сравнительный анализ влияния пульсации потока, температуры измеряемой жидкости и перепада температур жидкости и окружающей среды, давления жидкости, гидродинамических режимов течения жидкости на точность измерения кориолисова расходомера показал следующее:

1. Пульсации потока вызывают ошибки в измерениях среднего расхода на:

– собственной частоте кориолисовых расходомеров f_1;

– частоте, представляющей собой сумму и разность частоты пульсаций (f_p и собственной частоты – $f_p \pm f_1$;

– частоте, соответствующей следующей более высокой моде колебаний трубки f_2;

– частоте $f_2 \pm f_1$.

2. Изменения температуры окружающей среды и измеряемой жидкости приводят к ошибкам кориолисовых расходомеров в расчете плотности и массового расхода.

3. Изменение давления рабочей среды влияет на калибровку нулевого значения прибора.

4. Ламинарный режим течения жидкости негативно влияет на деформацию измерительной трубки, вызываемую силой Кориолиса, вносящей из-за этого меньший вклад в создание фазового сдвига.

Все это накладывает определенные ограничения на использование математического аппарата при выполнении моделирования кориолисового расходомера.

Синтез упрощенных моделей кориолисовых расходомеров, с возможностью учета всех факторов, их динамически меняющегося влияния на процесс измерения, довольно затруднителен. Выходом из подобной ситуации служит либо учет только наиболее значимых факторов, напрямую влияющих на моделируемый процесс, с целью выявления конкретной зависимости, либо применение современных средств численного моделирования, таких как *Ansys, COMSOL Multiphysics*. При этом необходимо учитывать, что применение численных моделей в режиме реального времени при работе конкретного расходомера с целью компенсации его погрешностей затруднено вследствие их сложности и высоких вычислительных затрат.

Выводы. Для обеспечения высокой точности измерения кориолисовыми расходомерами рекомендуется корректировать их работу в режиме реального времени с автоматической компенсацией комбинированного воздействия описанных факторов. Коррекцию вышеперечисленных эффектов необходимо выполнять непосредственно в электронике расходомера, а алгоритм коррекции имплантировать в устройство обработки сигналов расходомеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Wang T., Baker R. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions // Flow Measurement and Instrumentation. – 2014. – T.40. – C. 99-123. – DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015.

2. Svete, A., Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsic, I. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters // Journal of Sound and Vibration. – 2015. – T.352. – C. 30-45. – DOI:10.1016/j.jsv.2015.05.014.

3. Юрманов, В.А., Гудков К.В. Анализ некоторых погрешностей кориолисовых расходомеров // Современные информационные технологии. – 2006. – № 4. – С. 48-50.

4. Paidoussis M.P. Fluid-structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow. Volume 1. Academic Press: London, 1998. – 572 p.

5. Cheesewright R., Clark C. The effect of flow pulsations on Coriolis mass flow meters // J. Fluids Struct. – 1998. T.12. – C. 1025-1039. DOI:10.1006/jfls.1998.0176.

6. Belhadj A., Cheesewright R., Clark C. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose fecode // J. Fluids Struct. – 2000. – T.14. – C. 613-634. DOI:10.1006/jfls.2000.0287.

7. Kazahaya M. A mathematical model and error analysis of Coriolis mass flowmeters // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2011. – T.60. – C. 1163-1174. DOI:10.1109/TIM.2010.2086691.

8. Furuichi N., Cheong KH., Yoshida T. Experimental study to establish an evaluating method for the responsiveness of liquid flowmeters to transient flow rates // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – T.82. – 102067. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2021.102067.

9. Costa F., Pope J., Gillis K. Modeling Temperature Effects on a Coriolis Mass Flowmeter // Flow Measurement and Instrumentation. – 2020. – T.76. – 101811. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101811.

10. MacDonald, M., de Huu, M., Maury, R., Büker, O. Calibration of hydrogen Coriolis flow meters using nitrogen and air and investigation of the influence of temperature on measurement accuracy // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – T.79. – 101915. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2021.101915.

11. Lindsay G., Hay J., Glen N., Shariatipour S. Profiling and trending of Coriolis meter secondary process value drift due to ambient temperature fluctuations // Flow Meas. Instrum. – 2018. – T.59. – C. 225-232. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2017.12.007.

12. Lindsay G., Glen N., Hay J., Shariatipour S., Henry M. Coriolis meter density errors induced by ambient air and fluid temperature differentials // Flow Measurement and Instrumentation. – 2020. – T.73. – 101754. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2020.101754.

13. ISO 10790:2015. Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements).

14. Mills C. Calibrating and operating Coriolis flow meters with respect to process effects // Flow Measurement and Instrumentation. 2020. T. 71. 101649. DOI:10.1016/j.flowmeasinst. – 2019. – 101649.

15. Wang, Y. Hussain. Pressure effects on Coriolis mass flowmeters // Flow Meas. Instrum. – 2010. – № 21. – C. 504-510. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2010.08.001.

16. Mills C. The consistency of pressure effects between three identical Coriolis flow meters // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – T.80. – 102001. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2021.102001.

17. Kumar V., Anklin M., Schwenter B. Fluid-Structure Interaction (FSI) Simulations on the Sensitivity of Coriolis FlowMeter Under Low Reynolds Number Flows // Proceedings of the 15th Flow Measurement Conference (FLOMEKO), Taipei, Taiwan. – 2010. – C. 13-15.

18. Kutin J. et al. Weight vector study of velocity profile effects in straight-tube Coriolis flowmeters employing different circumferential modes // Flow Measurement and Instrumentation. – 2005. – T.16. – № 6. – C. 375-385. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2005.04.008.

19. Kutin J., Bobovnik G., Hemp J., Bajsic I. Velocity profile effects in Coriolis mass flowmeters: Recent findings and open questions // Flow Measurement and Instrumentation. – 2006. – T.17. – № 6. – C. 349-358.

20. Luo R., Wu J. Fluid-Structure Coupling Analysis and Simulation of Viscosity Effect on Coriolis Mass Flowmeter // International Journal of Aerospace and Lightweight Structures (IJALS). – 2013. – T.3. – №2. – 253. DOI:10.3850/S2010428613000652.

21. Vikram A. Kolhe, Ravindra L. Edlabadkar. Performance evaluation of Coriolis mass flow meter in laminar flow regime // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – T.77. – 101837. DOI:10.1016/j.flowmeasinst.2020.101837.

22. Haussmann, M., Claro Berreta, A., Lipeme Kouyi, G., Riviere, N., Nirschl, H., Krause, M. J. Large-eddy simulation coupled with wall models for turbulent channel flows at high Reynolds numbers with a lattice Boltzmann method – Application to Coriolis mass flowmeter // Comput. Math. Appl. – 2019. – T.78. – № 10. – C. 3285-3302. DOI:10.1016/j.camwa.2019.04.033.

Статья поступила в редакцию 16.05.2022
Статья принята к публикации 20.06.2022