

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПОТОКА «ЖИДКОСТЬ–ГАЗ» НА ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА

П.А. Тараненко, А.А. Кривоногов, Д.В. Телегин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

E-mail: taranenko@susu.ru

Аннотация. В связи с разработкой методов определения объемно-массовых параметров «жидкость–газ», выполняемой командой ученых Южно-Уральского государственного университета, в публикации представлены результаты натурных испытаний и моделирования процесса работы кориолисового расходомера с потоком газожидкостной смеси. Основной целью исследования является установление причин снижения точности измерения прибора при увеличении газовой фазы в потоке текущей среды. Для этого выполнена серия проливочных испытаний на специализированном стенде с возможностью впрыска газовой фракции в поток жидкости. Вычислено объемное содержание газовой фракции в текущей среде. Построена имитационная модель измерительной трубки кориолисового расходомера и выполнен нестационарный расчет в механическом и гидродинамическом модуле с двусторонней передачей полей давлений и перемещений на каждом временном шаге. Газожидкостная смесь смоделирована с использованием модели VOF. По результатам моделирования установлено, что на снижение точности измерения массового расхода влияет физика процесса, происходящего в системе «расходомерная трубка – газожидкостный поток». Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов и испытаний и показано их качественное совпадение. Установлено, что в случае двухфазного потока управляющая электроника и алгоритмы обработки сигнала не являются основным источником ошибки измерения.

Ключевые слова: кориолисов расходомер; двухфазный поток; массовый расход; объемная доля газа; интерфейс «жидкость – твердое тело».

Введение

Кориолисовы расходомеры широко применяют в самых разных отраслях промышленности для измерения массового расхода текущей однородной и однофазной среды. Успехи в применении кориолисовых расходомеров для решения задач измерения массового расхода однофазных и однородных потоков стимулируют попытки применить их и для измерения объемно-массовых параметров многофазной среды. При этом исследователи отмечают увеличение ошибки измерения массового расхода с ростом объемной доли воздуха в текущей среде. В частности, при попадании воздуха в текущую среду нарушается равномерность распределения флюида по длине измерительной трубки, возрастает демпфирование, что может повлиять на динамические свойства кориолисового расходомера (амплитуды, фазы колебаний и разность фаз, по которой определяется массовый расход).

Многие исследователи пытаются создать способ коррекции ошибки измерения двухфазного потока. В работах [1, 2] подчеркнуто, что фазовый сдвиг, по которому определяется массовый расход, зависит не только от массового расхода жидкости, но и от демпфирования в колебательной системе. В работе [3] предлагается повысить точность измерения расхода текущих жидкостей с пузырьками с помощью измерения скорости звука в технологической жидкости. В работе [4] предлагается повысить точность измерения расхода текущих жидкостей с пузырьками за счет эмпирических зависимостей, связывающих параметры потока двухфазной среды (объемная доля газа в текущей среде, расход среды, давления на входе и на выходе) с величиной массового расхода жидкости, выдаваемой измерительным прибором. В работе [5] указано, что ошибку измерения можно уменьшить путем регулирования коэффициента усиления привода катушки возбуждения.

Однако работ, посвященных исследованию причины снижения точности кориолисова расходомера с применением численного моделирования, не так много. В частности, в работе [6] предложена численная модель прохождения одиночного пузырька газа по прямолинейной трубке, смоделированной балкой Тимошенко, способная качественно описать отклик кориолисова расходомера на присутствие газовых пузырей в потоке жидкости. Но для определения причины увеличения ошибки этого недостаточно.

Наиболее поздняя работа Е. Шавриной [7] посвящена исследованию влияния асимметрии газораспределения на погрешность измерения расхода двухфазного потока «жидкость–газ» кориолисовым расходомером. По результатам конечноэлементных расчетов предлагается коррекция показаний расходомера, учитывающая эффект асимметричного распределения газа по измерительной трубке кориолисового расходомера. В публикации предлагается использовать модель многофазного течения VOF и модель турбулентности рейнольдсовых напряжений RSM. Однако входная граница модели разделена на два сегмента для воды и воздуха. Таким образом, в трубке получается переходный процесс смешивания компонентов, а не развитый двухфазный поток. В другой работе Е. Шавриной [8] выполнен двусторонний анализ кориолисового расходомера – FSI. Но моделирование выполнено для однофазного потока жидкости при кинематическом возбуждении приводной катушки, что приводит к некорректной временной задержке и, соответственно, массовому расходу.

Несмотря на опубликованные в современных статьях результаты исследований, эффект увеличения погрешности измерения кориолисового расходомера, обусловленный попаданием воздуха в текущую жидкость, остается необъясненным.

Таким образом задача создания имитационной модели, учитывающей двухкомпонентный поток «жидкость – газ» и двустороннее взаимодействие «поток–конструкция», является актуальной.

Экспериментальные исследования

Схема проливочного стенда приведена на рис. 1. Стенд состоит из насоса 1 с системой управления 2, бака с водой 3, эталонного кориолисового расходомера (КР) 4 и исследуемого КР 5. При включении насоса 1 происходит подача воды в систему. Текущая вода проходит через эталонный КР 4. Между эталонным и опытным расходомером установлен узел 7, через который с помощью компрессора в текущую жидкость осуществляется подача воздуха. Далее смесь воды и воздуха поступает в исследуемый расходомер 5. Давление на входе и на выходе в опытный расходомер регистрируется датчиками давления. После опытного расходомера смесь попадает в бак 3, в котором естественным путем происходит выведение воздуха из состава флюида и возвращение среды в ее изначальное состояние.

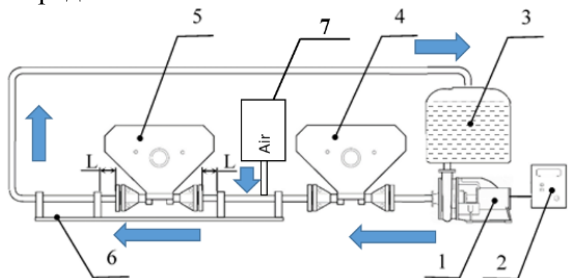


Рис. 1. Схема проливочного стенда: 1 – насос; 2 – система управления; 3 – бак с водой; 4 – эталонный КР; 5 – опытный КР; 6 – оснастка для закрепления исследуемого КР; 7 – устройство для впрыска воздуха в текущую среду

Целью экспериментов являлось сравнение показаний основных характеристик опытного и эталонного расходомера – исследование, необходимое для объяснения влияния газовой фазы на показания опытного расходомера.

Перед началом испытаний при фиксированном массовом расходе воды в 1 т/час (~0,3 кг/с) стенд работал в режиме холостого хода, т. е. перекачивал воду (без добавления воздуха) в течение 1,5 ч с целью стабилизации температуры в системе.

Эксперименты проведены при различном массовом расходе жидкости (1040 кг/ч, 1310 кг/ч, 1741 кг/ч), фиксировавшемся по эталонному расходомеру. Каждому расходу жидкости соответствовали 8 разных расходов воздуха. В эксперименте осуществляли запись напряжений с двух измерительных и центральной катушки эталонного и опытного расходомера, а также величин давления в газожидкостной смеси (ГЖС) на входе и выходе на опытном расходомере. Все данные регистрировались системой LMS Scadas Recorder. Длительность каждого эксперимента составляла 45 с.

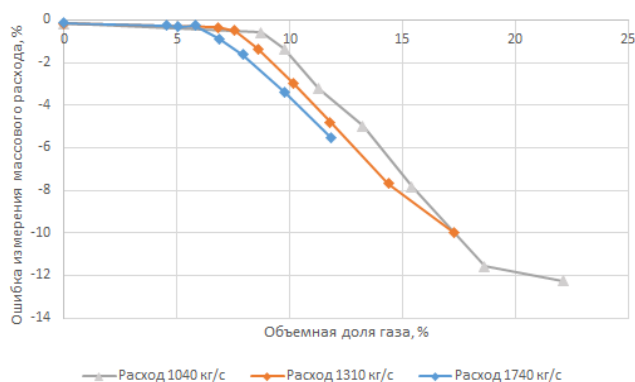


Рис. 2. Величина ошибки измерения массового расхода в зависимости от объемной доли газа

расходомера, датчиков температуры в расходомерах, показаниям массового расхода эталонного расходомера и объемного расхода воздуха рассчитывали объемные доли воздуха в жидкости (GVF) и по выражению (1) определяли относительную погрешность измерения массового расхода жидкости:

$$Err_{MF} = \frac{MF_{on} - MF_{эм}}{MF_{эм}} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

где MF_{on} – показания массового расхода на опытном расходомере; $MF_{эм}$ – массовый расход воды на эталонном расходомере.

В эксперименте наблюдали ошибки измерения массового расхода и плотности на опытном кориолисовом расходомере. Ошибки измерения массового расхода в зависимости от объемной доли воздуха в текущей среде приведены на рис. 2.

Объемные доли воздуха в жидкости GVF (Gas Volume Fraction) рассчитывали по выражению

$$GVF = \frac{Qv_{air}}{Qv_{sum}} , \quad (2)$$

где $Qv_{air} = \frac{MF_{air}}{\rho_{air}} \cdot \frac{T_1}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_1 + p_0}$ – объемный расход воздуха; $Qv_{sum} = Qv_{fluid} + Qv_{air}$ – объемный расход

ГЖС; $Qv_{fluid} = \frac{MF_{on}}{\rho_{fluid}}$ – объемный расход жидкости; $p_1 = \frac{p_{in}^1 + p_{out}^1}{2}$ – избыточное давление в ра-

бочих условиях; p_{in}^1 – избыточное давление в ГЖС на входе в расходомер; p_{out}^1 – избыточное давление в ГЖС на выходе из расходомера; $T_1 = 295,65$ К – температура в рабочих условиях; MF_{air} , кг/ч – массовый расход воздуха по показаниям массового расходомера; MF_{on} , кг/ч – массовый расход ГЖС на опытном расходомере; $\rho_{fluid} = 998,2$ кг/м³ – плотность воды при 20 °С; $\rho_{air} = \rho_{air_ideal} / Z = 1,20445$ кг/м³ – плотность воздуха при стандартных условиях (20 °С, 1 атмосфера) по ГОСТ 30319.1-96; $Z = 0,99963$ фактор сжимаемости воздуха; $T_0 = 293,15$ К – температура, соответствующая стандартным условиям; $p_0 = 101,325$ кПа – атмосферное давление.

Численные исследования

Расчетная модель ориентирована на получение количественных оценок влияния потока текущей среды с заданным массовым расходом жидкости и объемной долей воздуха GVF на вынужденные колебания U-образной измерительной трубки кориолисового расходомера.

В рассматриваемом расчетном случае моделируется одна трубка, защемленная с обеих сторон по торцам (рис. 3). Учитывая очень слабое влияние скорости текущей среды на собственные частоты трубки в диапазоне рабочих расходов прибора и очень слабое изменение разности фаз в околорезонансной области, частоту вынуждающего воздействия принимали равной низшей собственной частоте трубки с неподвижной жидкостью при нулевом содержании воздуха.

Например, в статье [8] говорится, что разница между вынужденными и свободными колебаниями незначительна и поэтому в качестве вынуждающего воздействия используется кинематическое возбуждение сечения трубки, в котором расположена центральная катушка, и задаются его перемещения по синусоидальному закону с частотой, равной собственной частоте заполненной

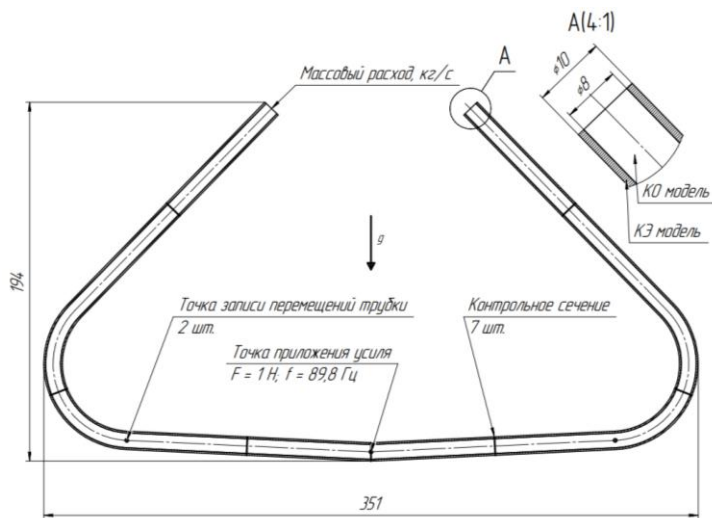


Рис. 3. Расчетная схема 2-way FSI модели

трубки с неподвижной средой. Однако в этом случае меняется форма установившихся вынужденных колебаний трубки, при этом форма вынужденных колебаний при таком возбуждении не совпадает с собственной формой вследствие ограничений, накладываемых на углы поворота трубки в сечении, соответствующем центральной катушке. Изменение формы вынужденных колебаний, в свою очередь, приводит к изменению временной задержки. Сопоставление расчетных и экспериментальных временных задержек показывает, что расчетные временные задержки, полученные при кинематическом возбуждении центрального сечения, не совпадают с экспериментальными, а расчетные временные задержки, полученные при силовом возбуждении, хорошо совпадают с показаниями опытного расходомера. Поэтому в рассматриваемой модели используется подход, при котором колебания измерительной трубки возбуждаются сосредоточенной силой, направленной перпендикулярно плоскости трубки.

Расчет колебательного режима трубки с протекающей по ней жидкостью выполняется как расчет переходного процесса, когда параметры состояния в каждой последующей временной точке используют предварительно найденные (заданные) параметры состояния в предыдущей временной точке. Расчет предусматривает выполнение итерационного анализа поведения жидкости и пошаговое выполнение расчетов во временных точках, соответствующих переходному процессу нарастающих колебаний (вызываемых действием сосредоточенной гармонической вынуждающей силы).

Расчет системы с текущей жидкостью выполняется с использованием двух разных решателей: модуля Transient Structural analysis для расчета трубки и модуля Fluent для расчета потока газожидкостной смеси. Взаимодействие модулей Transient Structural и Fluent реализуется по технологии Two-way FSI и управляется через модуль System Coupling.

Контрольно-объемная модель (КО модель) течения газожидкостной смеси создана в программном пакете ANSYS Fluent. Стратегия численного моделирования двухфазных потоков «газ–жидкость» в трубах выбрана на основе мирового опыта исследователей, изложенного в [9]. Для изучения процесса смешения компонент смеси вода/воздух решено использовать модель Volume of Fluid (VOF). Одно из её достоинств, отмеченное в статье [9], заключается в возможности получения различных режимов потоков.

Модели материалов воды (water-liquid) и воздуха (air) заимствованы из базы данных Fluent. В качестве первичной фазы выбран сжимаемый воздух, вторичной – вода. Поверхностное натяжение (surface tension) установлено постоянным и равным 0,072 Н/м. Реализована острая (sharp) граница раздела фаз. В численной реализации выбор остановлен на модели турбулентности SST.

В качестве входных граничных условий (inlet-water, inlet-gas) заданы массовые расходы воды и воздуха. На выходном отверстии в качестве граничного условия (pressure-outlet) задано избыточное давление, равное 0 МПа. Учтено влияние гравитации в уравнении импульсов, стенки определены как гидравлически гладкие.

С целью анализа распределения воздуха по длине трубки в процессе прохождения среды построено 7 поперечных сечений (см. рис. 3). В каждом сечении записываются значения массового

расхода смеси, воды и воздуха, а также GVF.

Модель стальной трубки – конечно-элементная модель (КЭ модель) создана в модуле ANSYS Transient, торцы трубки жестко закреплены, а в центральной точке трубки приложено гармоническое силовое воздействие (3) в перпендикулярном плоскости трубки направлении:

$$F(t) = F_0 \sin(2\pi \cdot f \cdot t), \quad (3)$$

где t – время, с, f – резонансная частота системы с неподвижной средой (Гц), F_0 – амплитуда силового возбуждения.

По результатам моделирования в контрольных точках № 1 и № 2 (см. рис. 3) строятся графики перемещений точек двух сечений по времени. После этого вычисляется временная задержка по фазовому сдвигу между точками при переходе через нулевое значение.

Время моделирования составляет 0,4 с. Предварительный этап от 0 до 0,2 с заложен для стабилизации временной задержки. Выполнено две серии расчетов с различными значениями объемной доли газа и двумя значениями шага по времени $1 \cdot 10^{-4}$ с и $5 \cdot 10^{-5}$ с. Соответствующие виброграммы приведены на рис. 4. Как видно из графиков, при меньшем шаге система дольше выходит на установившийся режим и имеет более высокие амплитуды. Однако по результатам расчетов установлено, что временная задержка стабилизируется раньше, чем осуществляется выход на установившийся режим по амплитудам колебаний.

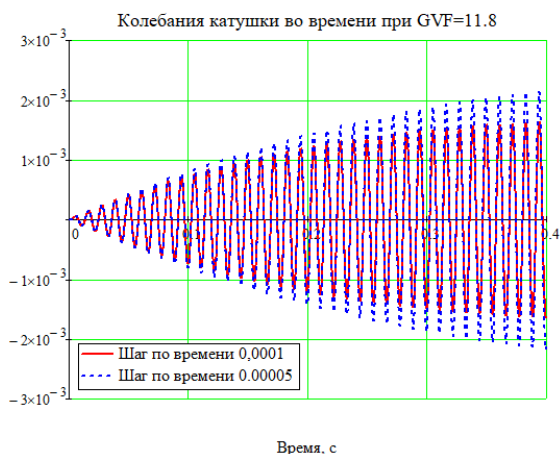


Рис. 4. Виброграммы измерительной катушки для двух шагов по времени

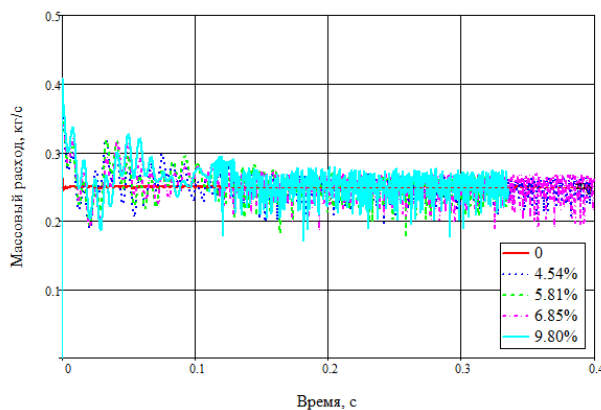


Рис. 5. Массовые расходы жидкости в седьмом сечении в зависимости от объемной доли воздуха

С целью подтверждения закона сохранения массы, переносимой по измерительной трубке, вычислены значения массового расхода по времени через каждое из семи сечений. Так, изменение массового расхода во времени через седьмое сечение в зависимости от объемной доли воздуха в текущей среде приведено на рис. 5. При осреднении по промежутку времени значения массового расхода независимо от объемной доли воздуха в текущей среде оказались равными заданному расходу. Таким образом на имитационной модели расходомера подтверждено выполнение закона сохранения массы: масса жидкости, протекающая через каждое из семи выбранных сечений, не изменяется. При этом прямо пропорциональная массовому расходу временная задержка, которая определяется по фазам механических колебаний измерительной трубки, при наличии пузырьков воздуха в текущей среде не совпадает с временной задержкой, полученной в случае течения однородной и однофазной жидкости (рис. 6). Из анализа результатов, приведенных на рис. 6, следует, что результаты FSI расчета зависят от шага по времени, однако качественно совпадают с результатами эксперимента. И при шаге по времени $1 \cdot 10^{-4}$ с, и при $5 \cdot 10^{-5}$ с наблюдается качественное совпадение расчетных временных задержек с экспериментальными – снижение временной задержки с ростом объемной доли воздуха в текущей среде. При этом необходимо отметить, что расчетная модель не содержит моделей системы управления и обработки сигналов, в ней, в частности, исключены функции поддержания резонансных колебаний и фильтрации сигналов с измерительных катушек. Таким образом, по результатам расчетов и испытаний установлено, что основным источником ошибки измерения массового расхода является взаимодействие текущей двухфазной среды с деформируемой измерительной трубкой кориолисового расходомера.

ра, приводящее к изменению кориолисовых сил, действующих со стороны текущей среды на измерительную трубку, и, как следствие, фаз механических колебаний узлов, соответствующих левой и правой измерительным катушкам расходомера.

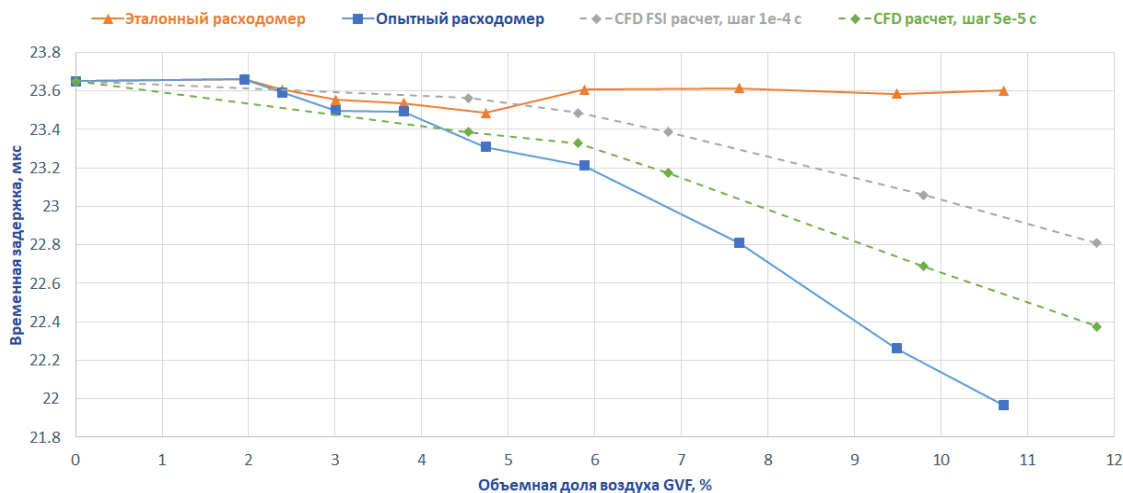


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных временных задержек

Заключение

Проведена серия экспериментальных исследований кориолисова расходомера в условиях течения двухфазной среды «жидкость–газ». В результате испытаний с ростом объемной доли воздуха в текущей среде наблюдали снижение показаний массового расходомера на опытном расходомере при неизменных показаниях на эталонном.

Разработана численная упруго-гидродинамическая модель течения двухфазной среды «жидкость–газ» по деформируемой измерительной трубке кориолисового расходомера, и выполнена серия расчетов при фиксированном расходе жидкости и различном объемном содержании воздуха в текущей среде. По результатам FSI расчетов установлено, что колебания расхода жидкости (и смеси) в выбранных произвольно семи сечениях трубки не зависят от объемной доли воздуха.

По результатам численного моделирования установлено, что при увеличении объемной доли воздуха в текущей двухфазной среде «вода–воздух» и постоянном расходе жидкости растет ошибка измерения в сторону уменьшения показаний расхода. Получено качественное совпадение результатов численного моделирования и эксперимента. По результатам численного моделирования исключено влияние алгоритмов управления и обработки сигналов на определение временной задержки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10151, <https://rscf.ru/project/23-29-10151/>.

Литература

1. Basse, N. Coriolis Flowmeter Damping for Two-Phase Flow due to Decoupling / N. Basse // Flow Measurement and Instrumentation. – 2016. – Vol. 52. – P. 40–52.
2. Two-Phase Damping for Internal Flow: Physical Mechanism and Effect of Excitation Parameters / C. Charreton, C. Béguin, A. Ross *et al.* // Journal of Fluids and Structures. – 2015. – Vol. 56. – P. 56–74.
3. Gysling, D.L. Accurate Mass Flow and Density of Bubbly Liquids using Speed of Sound Augmented Coriolis Technology / D.L. Gysling // Flow Measurement and Instrumentation. – 2023. – Vol. 91. – 102358.
4. Predicting the Output Error of a Coriolis Flowmeter under Gas-Liquid Two-Phase Conditions through Analytical Modelling / J.Liu, T.Wang, Y.Yan, X.Wang // Proceedings of the 18th International Flow Measurement Conference, Lisbon, Portugal. – 2019. – P. 26–28.
5. How a Coriolis Mass Flow Meter can Operate in Two Phase (Gas/Liquid) Flow // M.P. Henry, M. Duta, M.S. Tombs *et al.* // <https://www.researchgate.net/publication/236986368> (accessed January 14, 2022).
6. Лех, И.А. Влияние пузырьков газа на вибрационные параметры измерительных трубок кориолисового расходомера / И.А. Лех, П.А. Тараненко, В.П. Бескачко // Вестник Южно-

Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2019. – Т. 10, № 3. – С. 47–55.

7. The Investigation of Gas Distribution Asymmetry Effect on Coriolis Flowmeter Accuracy at Multiphase Metering / E. Shavrina, Y. Zeng, B.C. Khoo, V.T. Nguyen // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 20. – P. 7739.

8. Fluid-Solid Interaction Simulation Methodology for Coriolis Flowmeter Operation Analysis / E. Shavrina, V.-T. Nguyen, Z. Yan, B.C. Khoo // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – 8105.

9. Ban, S. Numerical Simulation of Two-Phase Flow Regime in Horizontal Pipeline and Its Validation / S. Ban, W. Pao, M.S. Nasif // *International J of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. – 2018. – Vol. 26, Iss. 6. – P. 1279–1314.

Поступила в редакцию 3 декабря 2024 г.

Сведения об авторах

Тараненко Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая механика», директор центра виброиспытаний и мониторинга состояния конструкций, Южно-Уральский государственный университет, Российская Федерация, e-mail: taranenkorpa@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3787-5260>.

Кривоногов Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Передовая инженерная школа двигателестроения и специальной техники «Сердце Урала», Южно-Уральский государственный университет, Российская Федерация, e-mail: krivonogovaa@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7042-1319>.

Телегин Дмитрий Владимирович – инженер центра виброиспытаний и мониторинга состояния конструкций, Южно-Уральский государственный университет, Российская Федерация, e-mail: telegindv@susu.ru.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2025, vol. 17, no. 1, pp. 32–39*

DOI: 10.14529/mmph250104

INVESTIGATION OF TWO-COMPONENT FLOW “LIQUID–GAS” INFLUENCE ON A CORIOLIS FLOWMETER DYNAMIC PARAMETERS

P.A. Taranenko, A.A. Krivonogov, D.V. Telegin

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: taranenkorpa@susu.ru

Abstract. In connection with the development of methods for determining the volume-mass parameters of “liquid–gas” performed by a team of scientists from the South Ural State University, the paper presents the results of full-scale tests and modeling of the operation of a Coriolis flowmeter with a gas-liquid mixture flow. The study aims to establish the causes of reduction of measurement accuracy by the device with an increase in the gas phase in the fluid flow. For this purpose, a series of pouring tests were performed on a specialized stand with the possibility of injecting a gas fraction into the liquid flow. The gas volume fraction in the fluid was calculated. A simulation model of the measuring tube of the Coriolis flowmeter was built and a non-stationary calculation was performed in the mechanical and hydrodynamic module with two-way transmission of pressure and displacement fields at each time step. The gas-liquid mixture was modeled using the VOF model. Based on the simulation results, it was found that the reduction in mass flow measurement accuracy is affected by the physics of the process occurring in the “flow tube – gas-liquid flow” system. A comparative analysis of the calculation and test results was performed, and their qualitative coincidence was shown. It was found that in the case of a two-phase flow, the control electronics and signal processing algorithms are not the main source of measurement error.

Keywords: *Coriolis flowmeter; two-phase flow; mass flow; gas volume fraction; fluid-structure interaction.*

References

1. Basse N. Coriolis Flowmeter Damping for Two-Phase Flow due to Decoupling. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, Vol. 52, pp. 40–52. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.09.005
2. Charreton C., Béguin C., Ross A., Étienne S., Pettigrew M.J. Two-Phase Damping for Internal Flow: Physical Mechanism and Effect of Excitation Parameters. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, Vol. 56, pp. 56–74.
3. Gysling D.L. Accurate Mass Flow and Density of Bubbly Liquids using Speed of Sound Augmented CORIOLIS Technology. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2023, Vol. 91, 102358. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2023.102358
4. Liu J., Wang T., Yan Y., Wang X. Predicting the Output Error of a Coriolis Flowmeter under Gas-Liquid Two-Phase Conditions through Analytical Modelling. *Proc. 18th International Flow Measurement Conference*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 26–28.
5. Henry M.P., Duta M., Tombs M.S., Yeung H., Mattar W. *How a Coriolis Mass Flow Meter can Operate in Two Phase (Gas/Liquid) Flow*. <https://www.researchgate.net/publication/236986368> (accessed January 14, 2022).
6. Lekh I.A., Taranenko P.A., Beskachko V.P. The Influence of Gas Bubbles on the Vibration Parameters of Measuring Tubes of a Coriolis Flowmeter. *Bulletin of the South Ural State University Series “Mathematics. Mechanics. Physics”*, 2019, Vol. 10, no. 3, pp. 47–55. DOI: 10.14529/mmph190306
7. Shavrina E., Zeng Y., Khoo B.C., Nguyen V.T. The Investigation of Gas Distribution Asymmetry Effect on Coriolis Flowmeter Accuracy at Multiphase Metering. *Sensors*, 2022, Vol. 22, no. 20, p. 7739. DOI: 10.3390/s22207739
8. Shavrina E., Nguyen V.-T., Yan, Z., Khoo B.C. Fluid-Solid Interaction Simulation Methodology for Coriolis Flowmeter Operation Analysis. *Sensors*, 2021, Vol. 21, 8105. DOI: 10.3390/s21238105
9. Ban S., Pao W., Nasif M.S. Numerical Simulation of Two-Phase Flow Regime in Horizontal Pipeline and its Validation. *International J. of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 2018, Vol. 26, Iss. 6, pp. 1279–1314.

Received December 3, 2024

Information about the authors

Taranenko Pavel Alexandrovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Technical Mechanics, Director of the Center for Vibration Testing and Structural Condition Monitoring, South Ural State University, e-mail: taranenkopa@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3787-5260>.

Krivoногоv Alexey Aleksandrovich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor, Senior Staff Scientist, Advanced Engineering School of Engine Building and Special Equipment “Heart of the Urals”, South Ural State University, e-mail: krivonogovaa@susu.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7042-1319>.

Telegin Dmitry Vladimirovich is Engineer at the Center for Vibration Testing and Structural Condition Monitoring, South Ural State University, e-mail: telegindv@susu.ru.