

На правах рукописи



ЯУШЕВ Александр Анатольевич

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, СВЯЗЕЙ
И ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ
ПОВЫШЕННЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРОВ
КОРИОЛИСОВОГО ТИПА**

Специальность:

**01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов
и аппаратуры**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Челябинск – 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: кандидат технических наук
Тараненко Павел Александрович,
доцент кафедры технической механики
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гуськов Александр Михайлович,
профессор кафедры прикладной механики
МГТУ им. Н.Э. Баумана

кандидат технических наук
Смотров Андрей Васильевич,
ведущий научный сотрудник научно-исследовательского комплекса прочности летательных аппаратов ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского»

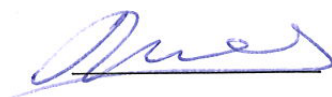
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Защита диссертации состоится 6 декабря 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.10 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» октября 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.В. Месропян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Кориолисовы расходомеры (КР) – одни из самых распространенных приборов, позволяющих измерять массовый и объёмный расход жидкостей и газов. Они обладают высокой точностью измерений, особенно востребованной при коммерческом учете нефти и газа. Однако известны случаи, когда присоединение расходомера к трубопроводам приводило к резкому снижению точности измерения массового расхода, являющейся одной из основных эксплуатационных характеристик расходомеров кориолисового типа. Это снижение обусловлено увеличением смещения нуля, которое, как показывает опыт эксплуатации, практически невозможно ни предсказать до монтажа расходомера ни полностью исключить после его установки даже при периодической настройке. Таким образом, разработка мероприятий (технических решений), направленных на повышение эксплуатационных характеристик за счет уменьшения влияния условий закрепления КР, является актуальной задачей для производителей и потребителей расходомеров.

Известны зарубежные КР, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, не зависящими от упруго-демпфирующих свойств закрепления. Однако они имеют высокую стоимость, а способы повышения эксплуатационных характеристик в большинстве случаев являются ноу-хау и в открытой литературе не опубликованы.

В диссертационной работе проблему повышения эксплуатационных характеристик расходомеров кориолисового типа предлагается решать путем исследования динамических процессов в системе «КР-трубопроводы», выявления закономерности снижения эксплуатационных характеристик и разработки методики диагностики смещения нуля, обусловленного влиянием упруго-демпфирующих свойств закрепления КР.

Степень разработанности темы. Наибольший вклад в исследование влияния различных факторов на эксплуатационные характеристики КР внесли Henry M., Stack C.P., Garnett R.B., Pawlas G.E., Cunningham T.J., Clark C., Cheesewright R., Wang S., Belhadj A., Sultan G., Hemp J., Keita N.M., Paidoussis M.P., Thomsen J.J., Dahl J., Enz S., Kutin J., Bajsic I., Bobovnik G., Anklin M., Wang T., Baker R., Kolahi K., Storm R., Rock H., Basse N.T., Weinstein J., Binulal B.R., Миронов М.А., Пятаков П.А., Андреев А.А., Даев Ж.А., Гудков К.В., Макарова Е.Ю., Гудкова Е.А., Романов В.А., Бескачко В.П., Пушнов А.В., Пархоменко Г.Г., Иванов А.Д., Лукин А.В. Однако влияние условий закрепления КР на смещение нуля исследовано только на примере прямой трубки, а причины его появления изучены недостаточно.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение эксплуатационных характеристик расходомеров кориолисового типа учетом упруго-демпфирующих свойств закрепления.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Разработать математическую модель системы «КР-трубопроводы» и выполнить ее верификацию по результатам модальных и проливочных испытаний.

2. Выполнить исследование динамических процессов в системе «КР-трубопроводы», выявить закономерности снижения эксплуатационных характеристик КР и разработать рекомендации по их повышению.

3. Разработать методику диагностики смещения нуля КР, вызванного влиянием условий его закрепления.

Научная новизна. Новыми являются следующие основные результаты:

1. Математическая модель системы «КР – трубопроводы», верифицированная по результатам модальных и проливочных испытаний, которая в отличие от известных позволяет оценивать влияние упруго-демпфирующих свойств системы «КР-трубопроводы» на эксплуатационные характеристики КР.

2. Впервые выявлена закономерность снижения эксплуатационных характеристик КР, заключающаяся в том, что при совпадении одной из собственных частот системы «КР-трубопроводы» с «рабочей» возрастают амплитуды колебаний корпуса на «рабочей» форме, скачкообразно изменяется фаза его колебаний на 180^0 , увеличивается разность фаз двух соответствующих точек измерительных трубок и декремент колебаний на «рабочей» форме, что в результате приводит к резкому увеличению смещения нуля.

3. Методика диагностики смещения нуля КР, вызванного влиянием условий его закрепления, которая в отличие от известных основана на оценке декрементов колебаний (мощности возбуждения) на двух противофазных формах колебаний измерительных трубок – «рабочей» и форме с двумя узлами.

Практическая значимость. В диссертационной работе получены следующие практические результаты:

1. Разработана расчетно-экспериментальная методика, позволяющая на этапе проектирования прогнозировать эксплуатационные характеристики КР с учетом влияния упруго-демпфирующих свойств их закрепления.

2. Разработаны практические рекомендации, позволяющие снизить влияние упруго-демпфирующих свойств закрепления на эксплуатационные характеристики КР.

3. Разработана методика диагностики смещения нуля КР, позволяющая на месте эксплуатации диагностировать снижение эксплуатационных характеристик, вызванное влиянием условий закрепления КР.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель системы «КР – трубопроводы».

2. Закономерность снижения эксплуатационных характеристик КР, которое обусловлено влиянием упруго-демпфирующих свойств закрепления.

3. Методика диагностики смещения нуля КР, вызванного влиянием упруго-демпфирующих свойств его закрепления.

Методы исследований. Методы расчетного и экспериментального модального анализа, метод конечных элементов, численные методы решения дифференциальных уравнений движения.

Достоверность. В расчетных исследованиях использованы фундаментальные законы теории механических колебаний. Адекватность разработанной модели системы «КР – трубопроводы» подтверждена сопоставлением результатов

расчетных и экспериментальных исследований. Экспериментальные результаты получены с использованием современного оборудования ЦКП «Экспериментальная механика» ЮУрГУ.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2015, 2016, СПбПУ, г. Санкт-Петербург, 2017); VIII Научно-технической конференции аспирантов и докторантов (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2016), 69 и 70 научной конференции ЮУрГУ (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2017, 2018), XI международной конференции Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (Глазго, 2017), Международной научно-технической конференции «Цифровая индустрия: состояние и перспективы развития» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2018), II международной научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание, модернизация» (Санкт-Петербург, 2019).

Реализация работы. Результаты диссертационной работы использованы при совершенствовании конструкции кориолисового расходомера ДУ15 и внедрены в практику ООО «ЭлМетро Групп».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, включая три статьи в журналах, рекомендованных ВАК России, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, пять статей в журналах, входящих в базу данных SCOPUS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, двух приложений, списка литературы, включающего 117 наименований, содержит 164 страницы машинописного текста, 67 иллюстраций, 18 таблиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Соглашение о предоставлении субсидии № 14.578.21.0191 от 03.10.2016. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57816X0191.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель и задачи работы, приведено ее краткое содержание.

В первой главе проведен анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвященных исследованиям влияния на эксплуатационные характеристики КР различных факторов. Наибольшее внимание уделено причинам, влияющим на смещение нуля.

Основные причины, вызывающие смещение нуля КР, обусловлены неидеальностью механической колебательной системы: неравномерным распределением массы, жесткости и демпфирования по длине измерительных трубок расходомера; асимметричными условиями закрепления; смещением катушки возбуждения относительно плоскости симметрии. Основополагающий вклад в изучение влияния этих факторов на смещение нуля КР внесли Keita N.M., Cunningham T.J., Kutin J., Bajsic I., Enz S., Thomsen J.J., Dahl J.

Из анализа литературы сделан вывод о том, что одним из основных факторов, приводящих к смещению нуля, является демпфирование. Так, к смещению нуля приводит асимметричное демпфирование, обусловленное, например, креплением измерительных трубок к основанию. Равномерно распределенное по длине измерительных трубок демпфирование не вызывает смещение нуля, но усиливает смещение нуля, обусловленное другими причинами.

Для анализа влияния различных факторов на эксплуатационные характеристики КР, в основном, используют математические модели одной прямой трубки с текущей средой (Kutin J., Bajsic I. и Enz S., Thomsen J.J., Dahl J.). Исследуемый в диссертации КР имеет две параллельные криволинейные измерительные трубки. Наиболее простую и универсальную конечноэлементную модель такого расходомера с учетом сил, действующих на измерительные трубки со стороны текущей среды, предложили Stack C.P., Garnett R.B., Pawlas G.E. Позднее она была дополнена Cheesewright, Clark C., Belhadj A., Wang S.

Рядом авторов (Гудков К.В., Kolahi K., Storm R. и Rock H.) высказано предположение о том, что условия закрепления КР влияют на точность измерения массового расхода. Однако причина этого влияния исследована недостаточно, поэтому проведение расчетно-экспериментальных исследований влияния упруго-демпфирующих свойств закрепления на эксплуатационные характеристики КР представляется актуальным.

Глава завершается формулировкой цели и задач исследования.

Во второй главе на типовой конструкции одного из ведущих российских производителей КР ДУ15 с двумя криволинейными измерительными трубками получены результаты расчетно-экспериментальных исследований влияния условий закрепления расходомера на показания массового расхода. Для экспериментальных исследований разработана оснастка, позволяющая варьировать жесткость трубопровода, к которому присоединен исследуемый расходомер, за счет изменения длины участка трубопровода L (рисунок 1).

Подачу текущей среды (воды) в исследуемый расходомер осуществляли с помощью проливочного стенда, схема которого приведена на рисунке 2. Он состоит из бака с водой, насоса с системой управления, эталонного и исследуемого расходомеров. Жесткость закрепления эталонного расходомера постоянна, а у исследуемого варьируется за счет изменения длин участков трубопровода, к которым он присоединен.

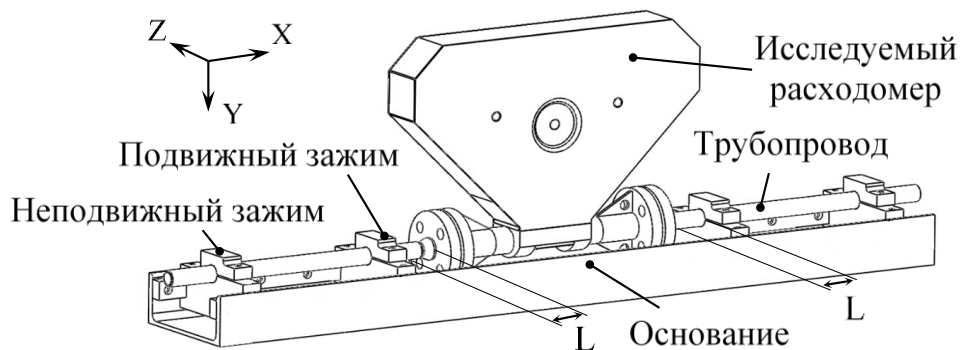


Рисунок 1 – Схема закрепления исследуемого КР в оснастке

Проведены испытания при максимальном расходе стенда 2 т/ч (составлявшем 2/3 от номинального расхода КР) в зависимости от длины участка трубопровода L . В экспериментах показания массового расхода на эталонном КР оставались постоянными, а на исследуемом резко возрастали при трех длинах участка L . Зависимость разности показаний эталонного и исследуемого КР $\Delta Q = |Q_{\text{эт}} - Q_{\text{иссл}}|$ от длины участка трубопровода приведена на рисунке 3. Так, при длине участка трубопровода $L_A = 24$ мм она составила 23 кг/ч, при длине $L_B = 202$ мм – 68 кг/час, при длине $L_B = 211$ мм – 21 кг/ч. Заметим, что допустимая погрешность измерения исследуемого расходомера составляет 1 кг в час на 1 тонну в час. Таким образом, максимальная погрешность измерения более чем в 20 раз превысила допустимую при номинальном расходе.

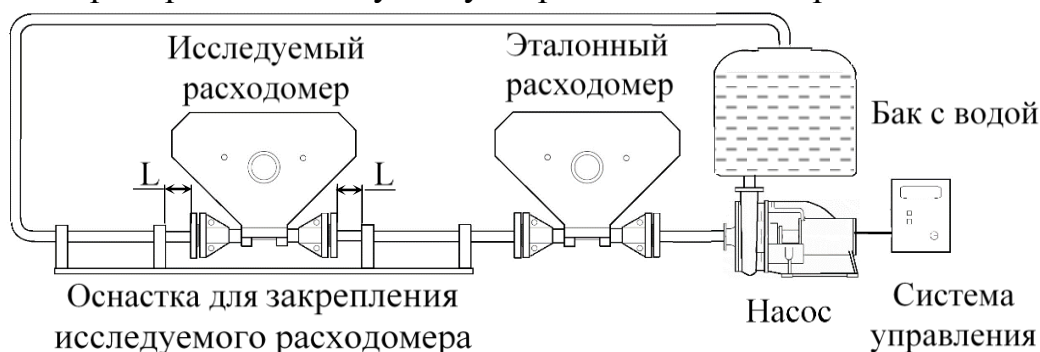


Рисунок 2 – Схема проливочного стенда

Приведенная на рисунке 3 кривая сохраняет свой вид и при нулевом расходе, поэтому сделано предположение о том, что причиной существенного увеличения разности показаний эталонного и исследуемого расходомеров является смещение нуля исследуемого КР.

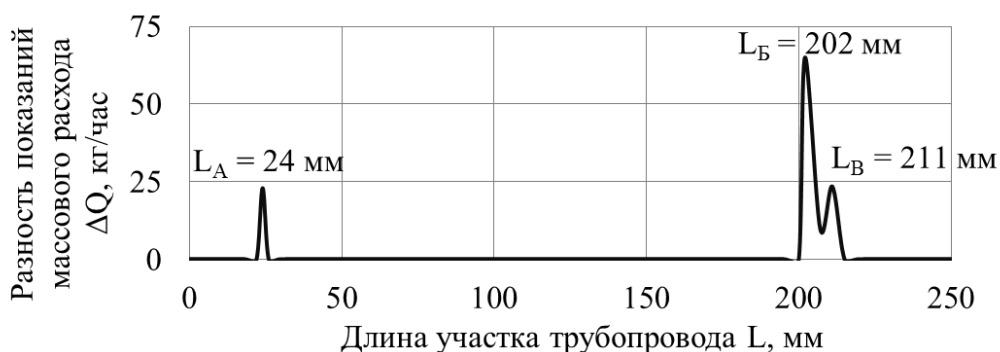


Рисунок 3 – Зависимость модуля разности показаний массового расхода исследуемого и эталонного расходомеров от длины участка трубопровода L при расходе 2 т/ч

Результаты испытаний послужили основанием для проведения дополнительных расчетных исследований по установлению причины появления смещения нуля при изменении жесткости закрепления КР. С использованием пакета программ ANSYS разработана балочно-оболочечная конечноэлементная модель системы «КР-трубопроводы» (рисунок 4).

Исходные положения и допущения: перемещения и деформации элементов КР и трубопровода являются бесконечно малыми; в балочных элементах учтена деформация сдвига; текущая жидкость считается несжимаемой, однородной и невязкой; скорость течения жидкости по сечению и длине трубки постоянна; пульсации скорости жидкости не учитываются; влияние давления

текущей жидкости на трубки не учитывается; температура жидкости и трубок постоянна; влиянием силы тяжести пренебрегаем.

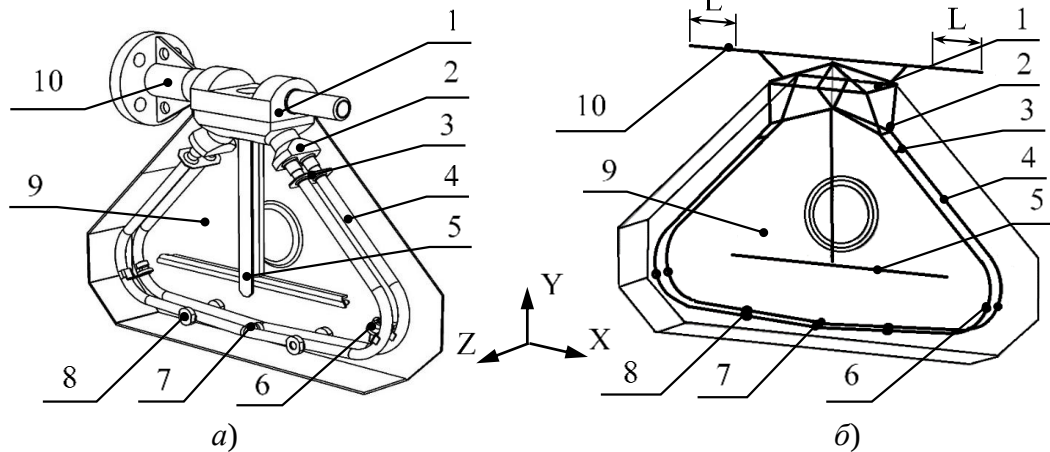


Рисунок 4 – Схема (а) и расчетная модель (б) системы «КР-трубопроводы»:
 1 – основание (BEAM188); 2 – сплиттер (BEAM188); 3 – переключки (BEAM188);
 4 – измерительные трубки с текущей жидкостью (BEAM188, MATRIX27);
 5 – направляющая токосъемников (BEAM188); 6 – измерительные катушки (MASS21);
 7 – центральная катушка (MASS21); 8 – грузы (MASS21); 9 – корпус (SHELL181);
 10 – трубопроводы с фланцем (BEAM188)

Дифференциальные уравнения движения системы «КР – трубопроводы» в матричной форме имеют вид

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([K] + [H(V)])\{\dot{x}\} + [C]\{x\} = \{P\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ и $[H(V)]$ – глобальные матрицы масс, жесткости, демпфирования и гироскопических сил, $\{x(t)\}$ и $\{P(t)\}$ – вектор-столбцы перемещений и внешних сил, V – скорость текущей среды. Глобальные матрицы масс, жесткости, демпфирования и гироскопических сил формируются на основе локальных матриц конечных элементов модели. Кориолисовы силы, действующие на измерительные трубки со стороны текущей среды, учитываются путем наложения элементов MATRIX27, определяемых матрицей гироскопических сил, на узлы элементов трубок BEAM188.

Временная задержка по результатам расчета определялась по формуле (2)

$$\Delta t = \frac{\arg(A_{12}^*) - \arg(A_{34}^*)}{2\pi f_{\text{раб}}} \quad (2)$$

$$A_{12}^* = A_1^* - A_2^*$$

$$A_{34}^* = A_3^* - A_4^*$$

$$A_j^* = A_j \cos(\varphi_j) + iA_j \sin(\varphi_j)$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

где $f_{\text{раб}}$ – «рабочая» частота расходомера;
 A_j^* – комплексная амплитуда колебаний j -ой точки на трубке;
 A_j и φ_j – амплитуда и фаза j -ой точки на трубке в направлении оси Z.

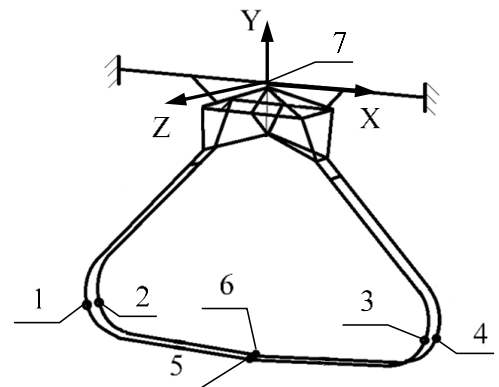


Рисунок 5 – Расположение точек на измерительных трубках, по комплексным амплитудам которых определяется временная задержка

С помощью разработанной конечноэлементной модели определены собственные частоты и формы системы «КР-трубопроводы» в зависимости от длины участка трубопровода без учета влияния текущей среды. Наибольший интерес представляют формы, на которых преимущественно колеблются измерительные трубки. Их можно разделить на противофазные и синфазные. Установлено, что интересующие нас собственные частоты, соответствующие противофазным формам колебаний измерительных трубок из плоскости ХУ, не зависят от длины участка трубопровода L . В этом случае собственные формы колебаний трубок являются самоуравновешенными. Первые три собственных противофазные формы колебаний измерительных трубок из плоскости ХУ приведены на рисунке 6.

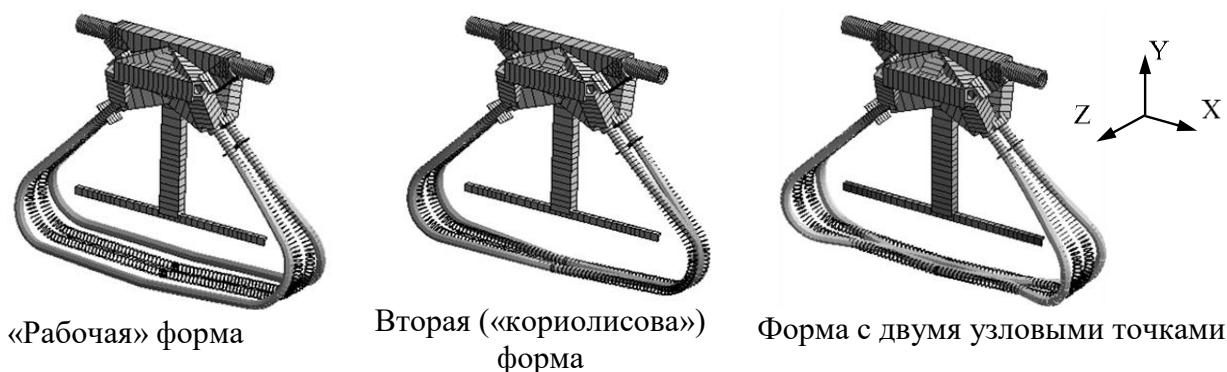


Рисунок 6 – Собственные формы колебаний системы «КР-трубопроводы», которым соответствуют противофазные колебания измерительных трубок из плоскости ХУ

Частоту внешнего вынуждающего воздействия в рабочем режиме КР и соответствующую ей форму установившихся вынужденных колебаний будем называть «рабочей». Поскольку система управления выводит КР на резонанс и поддерживает резонансные колебания измерительных трубок, то на рабочем режиме форма установившихся вынужденных колебаний будет совпадать (гипотеза Видлера) с собственной – низшей собственной формой противофазных колебаний измерительных трубок. При анализе собственных колебаний эту форму и соответствующую ей собственную частоту также будем называть «рабочей».

В отличие от частот, соответствующих противофазным формам (рисунок 6), частоты, соответствующие синфазным формам колебаний измерительных трубок, зависят от длины участка трубопровода. Заметим, что существуют длины участка трубопровода (L_A , L_B и L_V), при которых одна из собственных частот системы «КР-трубопроводы» совпадает с «рабочей». На соответствующих формах (рисунок 7) две измерительные трубки КР колеблются в противофазе с корпусом, а трубопроводы совершают крутильные (форма «А»), изгибные колебания из плоскости ХУ (форма «Б») или в плоскости ХУ (форма «В»).

Сделано предположение о том, что обнаруженное при некоторых длинах участка трубопровода (L_A , L_B и L_V) совпадение одной из собственных частот системы «КР-трубопроводы» с «рабочей» приводит к смещению нуля. Экспериментальной проверке этого предположения посвящена третья глава.

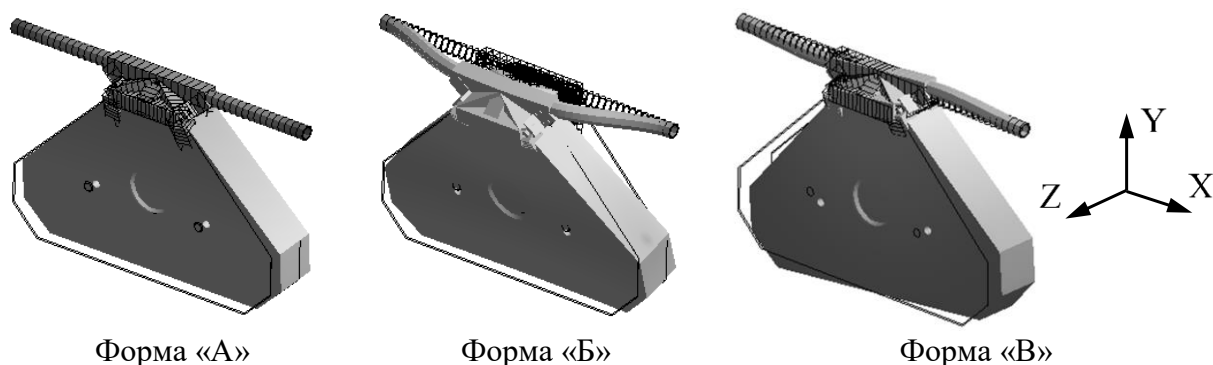


Рисунок 7 – Формы колебаний системы «КР-трубопроводы», соответствующие частоты которых зависят от длины участка трубопровода и расположены вблизи «рабочей» частоты

В третьей главе разработана методика экспериментального модального анализа системы «КР-трубопроводы». С ее использованием выполнено исследование собственных частот, форм и декрементов колебаний системы «КР-трубопроводы» в зависимости от длины участка трубопровода L .

Установлено, что первые три противофазные формы колебаний измерительных трубок КР из плоскости XY и соответствующие им собственные частоты не зависят от длин участка трубопровода. Колебания корпуса и трубопровода на этих частотах не зарегистрированы. В отличие от противофазных, синфазные формы колебаний измерительных трубок из плоскости XY и соответствующие им собственные частоты зависят от длин участка трубопровода. В этом случае колебания измерительных трубок уравниваются колебаниями корпуса и трубопровода.

При длинах участка трубопровода L_A , L_B и L_V , при которых в эксперименте наблюдалось резкое увеличение смещения нуля, обнаружено совпадение одной из собственных частот «А», «Б» или «В» системы «КР-трубопроводы» с «рабочей» (таблица 1). Соответствующие этим частотам собственные формы совпадают с расчетными, приведенными на рисунке 7.

Таблица 1 – Экспериментальные собственные частоты системы «КР-трубопроводы» и смещение нуля в зависимости от длины участка трубопровода

Длина участка трубопровода L , мм	24	50	100	150	202	211
«Рабочая» частота, Гц	94,1	94,1	94,1	94,1	94,1	94,1
Частота «А», Гц	94,1	91,8	89	87,7	86,6	86,4
Частота «Б», Гц	262	207,8	168,5	123,8	94,1	93,6
Частота «В», Гц	102,5	102,1	101,2	99,3	95,7	94,1
Смещение нуля Δt_0 , 10^{-6} с	0,300	0,003	0,002	0,003	0,889	0,310
Смещение нуля Q_0 , кг/час	23,0	0,2	0,1	0,2	68,1	23,5

Из анализа литературы, выполненного в первой главе, установлено, что одним из основных факторов, влияющих на смещение нуля, является демпфирование. Поэтому по результатам испытаний определены декременты колебаний на собственных формах системы «КР-трубопроводы» – «А», «Б», «В», «рабочей» и «кориолисовой» в зависимости от длины участка трубопровода L .

Декременты колебаний на формах «А», «Б» и «В» определяли резонансным методом, а на обладающих очень малым демпфированием «рабочей» и «кориолисовой» формах – по виброграмме затухающих колебаний.

При длине участка трубопровода $L_A = 24$ мм декремент колебаний на форме «А» составлял $\delta_A = 0,0056$, при $L_B = 202$ мм на форме «Б» – $\delta_B = 0,0078$, при $L_B = 211$ мм на форме «В» – $\delta_B = 0,02$, что более чем на порядок превышало декремент на «рабочей» форме. В случаях совпадения собственных частот «А», «Б» или «В» с «рабочей» декремент колебаний на «рабочей» форме увеличился, а на «кориолисовой» – не изменялся. Зависимость декремента колебаний на «рабочей» форме от длины участка трубопровода L приведена на рисунке 8. Так, при длине участка трубопровода $L_B = 202$ мм, соответствующей наибольшему смещению нуля, наблюдалось увеличение декремента на «рабочей» форме на 20%.



Рисунок 8 – Зависимость декремента колебаний на «рабочей» форме от длины участка трубопровода L

На основании анализа результатов модальных испытаний установлено, что смещение нуля резко возрастает при совпадении одной из собственных частот системы «КР-трубопроводы» («А», «Б» или «В») с «рабочей» и сопровождается увеличением декремента колебаний на «рабочей» форме.

На практике к совпадению собственных частот «А», «Б» или «В» с «рабочей» приводит не только изменение длины участка трубопровода, но и плотности текущей среды. В случае изменения плотности жидкости «рабочая» частота меняется сильнее, чем собственные частоты «А», «Б» и «В». При заполнении трубок водой «рабочая» частота уменьшается на 7%, собственная частота «А» на 4%, «Б» – на 3%, «В» – на 5%. Плотность измеряемой среды меняется во время эксплуатации, например, из-за изменения температуры, что в случае близости собственных частот «А», «Б» или «В» к «рабочей» приводит к неконтролируемому изменению смещения нуля. Поэтому при верификации математической модели необходимо обеспечить близость расчетных и экспериментальных собственных частот КР независимо от плотности текущей внутри измерительных трубок среды.

Четвертая глава посвящена верификации математической модели системы «КР-трубопроводы» по результатам модальных и проливочных испытаний, определению амплитуд и фаз вынужденных колебаний КР и его смещения нуля в зависимости от упруго-демпфирующих свойств трубопроводов.

Установлено, что смещение нуля зависит от близости частот «А» или «Б» к «рабочей», величин дисбаланса измерительных трубок и декремента колебаний на «рабочей» форме. Так, в случае симметрии расчетной модели относительно плоскостей XY и YZ на «рабочей» форме колебания измерительных трубок являются самоуравновешенными и смещения нуля не происходит. Поэтому в расчетную модель внесена асимметрия путем размещения в точке 1 (рисунок 5) дополнительной сосредоточенной массы из условия совпадения смещения нуля в расчете и эксперименте при длине участка трубопровода L_B . Величину внутреннего трения в материале элементов КР задавали из условия равенства расчетного и экспериментального декрементов колебаний на «рабочей» форме, а величину внутреннего трения в материале трубопровода – на форме «Б». Использование в расчетной модели системы «КР-трубопроводы» модели непропорционального демпфирования позволило в случае совпадения собственной частоты «Б» с «рабочей» получить на амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) виброскоростей точек 1,2,3,4 (рисунок 5) в окрестности «рабочей» частоты один пик (рисунок 9а), наблюдаемый экспериментально. При использовании модели пропорционального демпфирования не удалось добиться даже качественного совпадения расчетной и экспериментальной АЧХ (рисунок 9б).

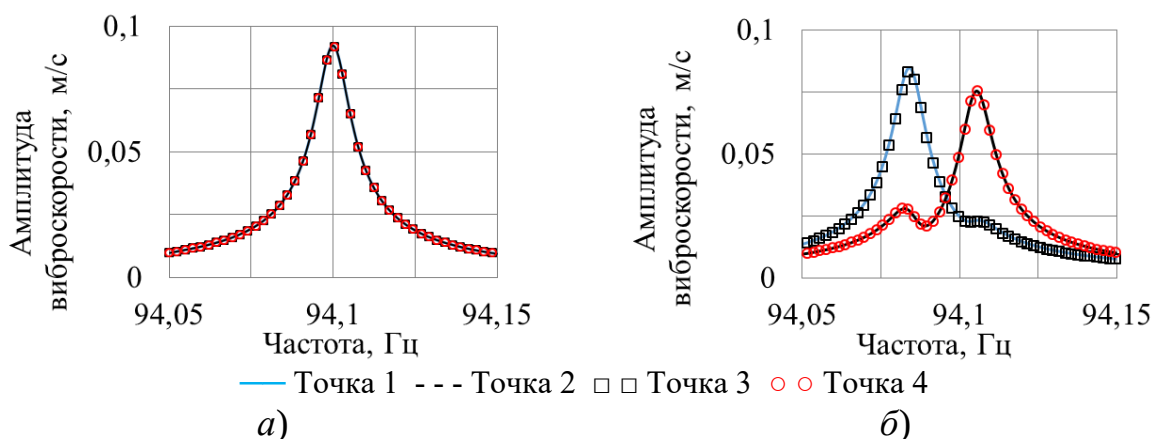


Рисунок 9 – АЧХ виброскоростей точек на измерительных трубках в направлении оси Z в случае близости собственной частоты «Б» к «рабочей»: а – демпфирование в системе «КР-трубопроводы» задано непропорциональным (внутреннее трение в материале трубопровода на два порядка больше, чем в остальных элементах модели); б – демпфирование в системе «КР-трубопроводы» задано пропорциональным

Таким образом, расчетным путем удалось получить наблюдаемое экспериментально резкое увеличение смещения нуля в случаях, когда собственные частоты «А» или «Б» совпадают с «рабочей» (рисунок 10).

С использованием расчетной модели системы «КР-трубопроводы» получены амплитуды виброскоростей измерительных трубок в районе центральной катушки и амплитуды виброскоростей корпуса (точки 5, 6 и 7 (рисунок 5)) в зависимости от длины участка трубопровода (рисунок 11). Установлено, что при длинах трубопровода (L_A или L_B), на которых собственная частота «А» или «Б» совпадает с «рабочей», происходит резкое увеличение амплитуд колебаний корпуса и уменьшение амплитуд колебаний измерительных трубок.

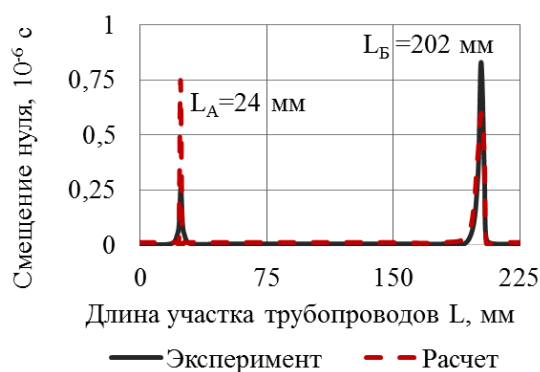


Рисунок 10 – Расчетная и экспериментальная зависимости смещения нуля от длины участка трубопровода

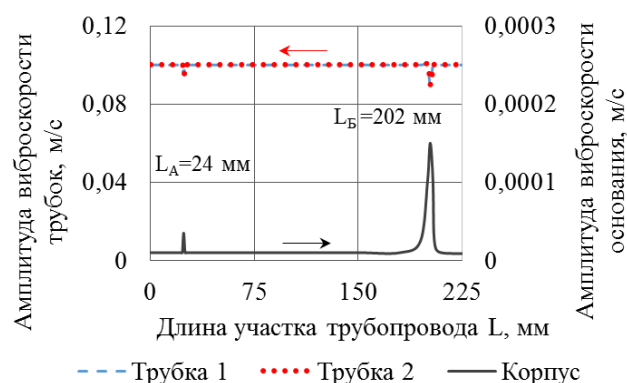


Рисунок 11 – Расчетная зависимость амплитуд виброскоростей измерительных трубок и корпуса от длины участка трубопровода на «рабочей» частоте

Важно отметить, что при совпадении двух частот происходит изменение фазы колебаний корпуса КР на 180^0 . В случае, когда частота «А» или «Б» располагается ниже «рабочей», точка 7 (рисунок 5) на «рабочей» форме колеблется в фазе с первой измерительной трубкой и в противофазе со второй. В случае, когда частота «А» или «Б» располагается выше «рабочей», точка 7 на «рабочей» форме колеблется в фазе со второй трубкой и в противофазе с первой. Совпадение двух частот приводит не только к изменению фазы колебаний корпуса на 180^0 , но и резкому увеличению разности фаз колебаний двух трубок.

Таким образом, совпадение одной из собственных частот «А» или «Б» с «рабочей» приводит к изменению амплитуд и фаз колебаний измерительных трубок и корпуса на «рабочей» форме и, как следствие, к смещению нуля.

В диссертации разработана методика построения конечноэлементной модели системы «КР-трубопроводы», верифицированной по результатам модальных и проливочных испытаний. В качестве критериев эквивалентности модели и ее натурного прототипа выбраны собственные частоты, соответствующие «рабочей» и двум следующим противофазным формам колебаний измерительных трубок из плоскости ХУ (рисунок 6), найденные в случае пустых и заполненных водой измерительных трубок. Варьируемые параметры модели: расположение боковых (измерительных) катушек и перемычки; массы навесных элементов; внутренний диаметр измерительных трубок и трубопроводов; размеры сечения и длина элемента, расположенного между основанием КР и трубопроводами; декременты колебаний δ_A , δ_B и δ_V на собственных формах.

Результаты сравнения собственных частот математической модели системы «КР – трубопроводы» и натурного прототипа до и после корректировки модели приведены в таблице 2. Результаты расчета этой модели послужили основанием для дальнейшей разработки комплекса мероприятий, позволяющих исключить совпадение собственной частоты системы «КР-трубопроводы» с «рабочей» или диагностировать это совпадение.

Таблица 2 – Результаты сравнения собственных частот математической модели системы «КР – трубопроводы» и натурного прототипа до и после корректировки модели

	Эксперимент	Расчет до корректировки		Расчет после корректировки	
Пустые трубки					
Частота	Частота, Гц	Частота, Гц	Δ, %	Частота, Гц	Δ, %
«Рабочая»	100,8	102,1	1,29	100,9	0,10
«Кориолисова»	188,4	188,8	0,21	188,3	0,05
Форма с двумя узлами	397,0	384,3	3,20	389,6	1,86
Трубки заполнены водой					
«Рабочая»	94,1	94,8	0,74	94,15	0,05
«Кориолисова»	174,5	174,0	0,29	174,4	0,06
Форма с двумя узлами	368,1	353,7	3,91	360,3	2,11
Расход, кг/ч	Задержка, мкс	Задержка, мкс	Δ, %	Задержка, мкс	Δ, %
2000	27	29,3	8,52	27,2	0,74

Пятая глава посвящена разработке комплекса мероприятий, включающего практические рекомендации по монтажу КР с двумя измерительными трубками Δ -, U- или Ω -образной формы и методику диагностики смещения нуля КР, вызванного влиянием условий его закрепления.

Практические рекомендации основаны на отстройке собственных частот системы «КР-трубопроводы» от «рабочей», что позволяет независимо от жесткости трубопроводов обеспечить отсутствие собственных частот системы «КР-трубопроводы» в запретном диапазоне, содержащем «рабочую» частоту. Для этого необходимо:

1. На этапе производства расчетно-экспериментальным путем определить запретный диапазон частот, содержащий «рабочую» частоту, с учетом заданного диапазона изменения плотности текущей среды.

2. Вывести собственные частоты системы «КР-трубопроводы» из запретного диапазона, сделав их выше правой границы запретного диапазона.

- 2.1. До монтажа КР расчетно-экспериментальным путем подобрать параметры его дополнительного закрепления за корпус из условия, чтобы независимо от длины участка трубопровода собственные частоты системы «КР-трубопроводы» находились выше «рабочей».

- 2.2. В случае установки опоры трубопроводов вблизи фланцев рекомендуется на этапе проектирования КР подбирать его упруго-массовые характеристики таким образом, чтобы при абсолютно жестком закреплении КР за фланцы расчетная собственная частота «А» (низшая частота) системы «КР-трубопроводы» располагалась ниже левой границы запретного диапазона.

Разработанные рекомендации по монтажу апробированы на КР ДУ15. Для повышения жесткости закрепления КР на верхний бортик корпуса приварили два кронштейна и соединили их с достаточно жестким основанием (рисунок 12).

Экспериментальная зависимость смещения нуля от длины участка трубопровода в случае дополнительного закрепления расходомера за корпус представлена на рисунке 13. Установлено, что дополнительное закрепление КР за корпус позволило уменьшить количество собственных форм системы «КР-трубопроводы», соответствующие частоты которых совпадают с «рабочей», с трех до одной, а максимальное смещение нуля – в пять раз.

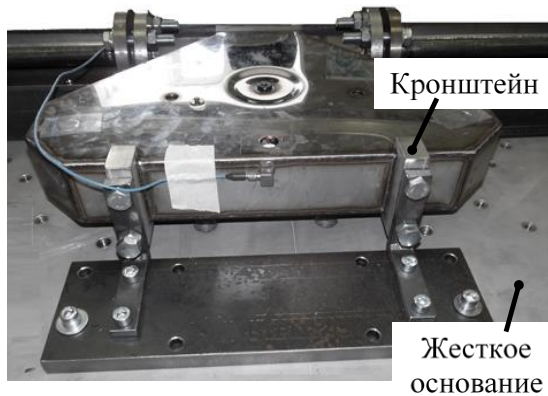


Рисунок 12 – Дополнительное закрепление за корпус расходомера

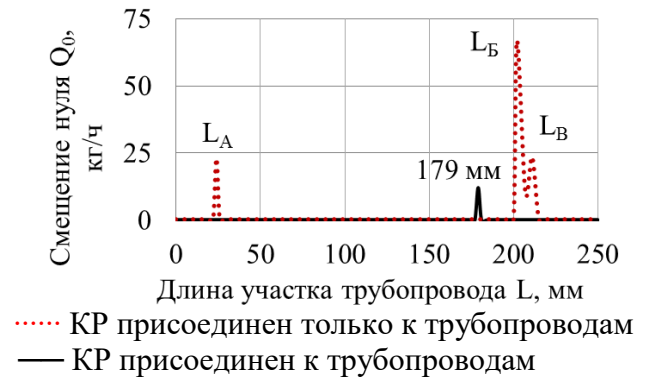


Рисунок 13 – Зависимость смещения нуля от длины участка трубопровода

Разработанные рекомендации по монтажу КР не всегда позволяют полностью исключить влияние упруго-демпфирующих свойств закрепления на смещение нуля. Поэтому разработана методика диагностики смещения нуля КР, вызванного условиями его закрепления. Она заключается в экспериментальной оценке декремента колебаний на «рабочей» и форме с двумя узлами. Оценка демпфирования на двух формах обусловлена его зависимостью от многих факторов. В частности, оно существенно возрастает при появлении в текущей жидкости пузырьков газа. Установлено, что с увеличением объемной доли воздуха в текущей жидкости декремент колебаний возрастает на обеих формах. В случае увеличения смещения нуля, обусловленного влиянием упруго-демпфирующих свойств закрепления КР, декремент колебаний на «рабочей» форме возрастает, а на форме с двумя узлами – не изменяется (рисунок 14).

Таким образом, одновременное увеличение декрементов колебаний на двух собственных формах не связано с условиями закрепления КР. А увеличение декремента колебаний только на «рабочей» форме свидетельствует о влиянии на смещение нуля условий закрепления КР и необходимости изменения жесткости закрепления.

При реализации этой методики на практике декременты колебаний удобнее оценивать по мощности, необходимой для возбуждения колебаний измерительных трубок, т.е. измерять напряжение и силу тока на центральной катушке. Зависимость относительной мощности на центральной катушке от смещения нуля, обусловленного влиянием упруго-демпфирующих свойств закрепления КР, представлена на рисунке 15. За единицу принята мощность, необходимая для возбуждения «рабочих» амплитуд колебаний, когда смещение нуля отсутствует. Реализация этой методики не требует дополнительных датчиков и изменения конструкции КР.

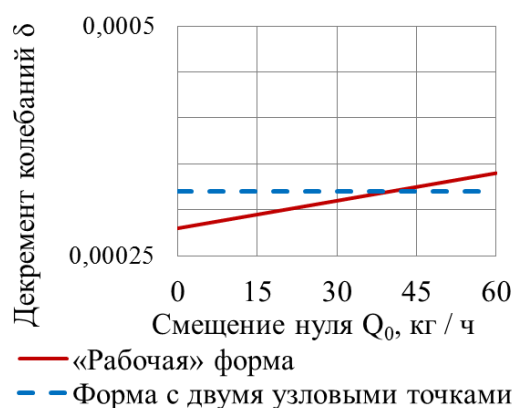


Рисунок 14 – Зависимость декремента колебаний на «рабочей» форме от смещения нуля, вызванного условиями закрепления КР

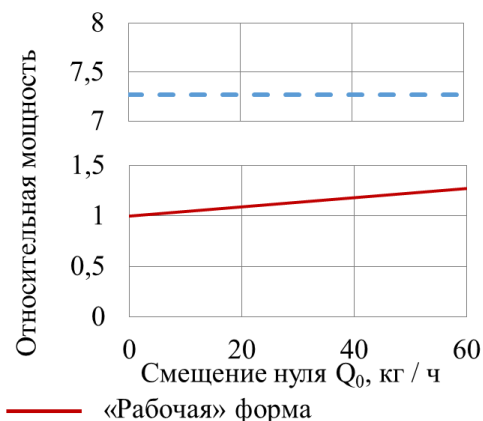


Рисунок 15 – Зависимость мощности на центральной катушке от смещения нуля, вызванного условиями закрепления КР

Методика диагностики смещения нуля КР, обусловленного влиянием упруго-демпфирующих свойств закрепления КР, состоит в следующем:

1. Получение на этапе производства КР мощностей W_1 и W_2 , требуемых для возбуждения «рабочей» и формы с двумя узлами в зависимости от массового расхода при закреплении КР, не оказывающем влияния на смещение нуля.
2. Определение мощностей W_1^* и W_2^* после монтажа КР и в процессе его эксплуатации с заданной периодичностью. Если $W_1^* \geq W_1$ и $W_2^* \geq W_2$, то влияние условий закрепления на смещение нуля отсутствует. Выполнение только первого из этих двух условий свидетельствует о влиянии на смещение нуля условий закрепления КР. В этом случае необходимо изменить жесткость закрепления КР так, чтобы собственные частоты системы «КР-трубопроводы» (которые можно идентифицировать в результате экспериментального модального анализа) располагались за пределами запретного диапазона, содержащего «рабочую» частоту.

Методика апробирована на КР ДУ15, ДУ25 и ДУ50.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в диссертации результаты расчетно-экспериментальных исследований позволяют повысить эксплуатационные характеристики расходомеров кориолисового типа путем учета влияния упруго-демпфирующих свойств их закрепления и распространяются на модели КР с двумя измерительными трубками Δ -, U- или Ω -образной формы с условным диаметром от ДУ5.

1. Разработана математическая модель системы «КР-трубопроводы» и выполнена ее верификация по результатам модальных и проливочных испытаний. Модель, в отличие от известных, позволяет оценивать влияние упруго-демпфирующих свойств системы «КР-трубопроводы» на эксплуатационные характеристики КР. На этой модели подтверждено наблюдаемое экспериментально снижение эксплуатационных характеристик КР «ЭЛМЕТРО-Фломак S015», которое заключается в увеличении смещения нуля прибора, приводящем к увеличению погрешности измерения в 20 раз при номинальном расходе.

2. Выполнено исследование динамических процессов в системе «КР-трубопроводы», выявлены закономерности снижения эксплуатационных характеристик КР и разработаны рекомендации по их повышению. Установлено, что при совпадении одной из собственных частот системы «КР-трубопроводы» с «рабочей» возрастают амплитуды колебаний корпуса на «рабочей» форме, скачкообразно изменяется фаза его колебаний на 180^0 , увеличивается разность фаз двух соответствующих точек измерительных трубок и декремент колебаний на «рабочей» форме, что в результате приводит к резкому увеличению смещения нуля. На основе выявленных закономерностей рекомендуется дополнительно закреплять КР за корпус либо конструктивно снижать первую собственную частоту колебаний закрепленного за фланцы КР ниже «рабочей» и устанавливать опоры трубопроводов вблизи фланцев, что позволяет независимо от жесткости трубопроводов уменьшить количество собственных частот системы «КР-трубопроводы» в запретном диапазоне, содержащем «рабочую» частоту. В частности, дополнительное закрепление КР «ЭЛМЕТРО-Фломак S015» за корпус позволило снизить смещение нуля, обусловленное влиянием упруго-демпфирующих свойств закрепления, в пять раз.

3. Разработана методика диагностики смещения нуля КР, вызванного влиянием условий его закрепления. Она позволяет путем оценки декремента колебаний на двух собственных противофазных формах колебаний трубок – «рабочей» и форме с двумя узлами диагностировать смещение нуля. Установлено, что диагностическим признаком, свидетельствующим о необходимости изменения жесткости закрепления расходомера, является увеличение мощности, необходимой для возбуждения «рабочей» формы, при постоянной мощности, необходимой для возбуждения формы с двумя узлами. Методика апробирована на серийных КР «ЭЛМЕТРО-Фломак S015», «ЭЛМЕТРО-Фломак S025» и «ЭЛМЕТРО-Фломак S050». Установлено, что при совпадении одной из собственных частот системы «КР-трубопроводы» с «рабочей» максимальное смещение нуля составило для КР S050 – 0,3 мкс, для КР S025 – 0,4 мкс и для КР S015 – 0,7 мкс, что превысило допустимую погрешность измерения в 10, 15 и 20 раз соответственно при номинальных расходах 60, 12 и 3 тонны в час. При этом мощность на «рабочей» форме увеличивалась для КР S050 на 8%, для S025 на 11%, для КР S015 на 19%.

Перспективы дальнейшего развития исследований связаны со следующими направлениями:

- расчетно-экспериментальное исследование влияния на эксплуатационные характеристики КР с малоизогнутыми и прямыми измерительными трубками упруго-демпфирующих свойств их закрепления;
- расширение разработанной методики диагностики КР за счет дополнения ее функциями, позволяющими оценивать влияние на эксплуатационные характеристики изменения жесткости и массы измерительных трубок в случаях, когда расходомер работает с агрессивными жидкостями, вызывающими утонение измерительных трубок, или со средами, вызывающими налипание на них дополнительной массы.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК:

1. Яушев, А.А. Анализ влияния условий закрепления на смещение нуля кориолисового расходомера / А.А. Яушев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – Т. 17. – №. 4. – С. 91-98.
2. Расчетно-экспериментальное исследование частот и форм собственных колебаний сварного корпуса кориолисового расходомера / А.А. Яушев [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2018. – Т. 10. – №. 1. – С. 45-51.
3. Яушев, А.А. Расчетно-экспериментальное исследование стабильности нуля кориолисового расходомера в зависимости от упругодемпфирующих свойств закрепления / А.А. Яушев, П.А. Тараненко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – Т. 19. – №. 1. – С. 47-55.

В других источниках

4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2018664228. Численное решение задачи о собственных и установившихся вынужденных колебаниях системы «кориолисов расходомер-трубопроводы» с учетом текущей среды / П.А. Тараненко, А.А. Яушев; заявитель и правообладатель: Южно-Уральский государственный университет. – заявка № 2018661791; заявл. 26.10.18; зарегистр. 13.11.18.
5. Yaushev, A.A. Estimation of residual stresses influence on oscillation modes of welded housing part / A.A. Yaushev, P.A. Taranenko, A.V. Zhestkov // Procedia engineering. – 2015. P. 75–80. (Scopus).
6. Yaushev, A.A. Study of the Oscillation Modes of a Coriolis Flowmeter Using a Parametric Finite Element Model, Verified by the Results of Modal Testing / A.A. Yaushev, P.A. Taranenko, V.A. Loginovskiy // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 336-340. (Scopus).
7. Yaushev, A.A. Analysis of influence of mechanical boundary conditions on zero point shift of Coriolis flowmeter / A.A. Yaushev, P.A. Taranenko, V.A. Loginovskiy // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 552-557. (Scopus).
8. Henry, M. Method for Diagnosing Random Zero Shift in Coriolis Flowmeter Caused by its Mechanical Support / M. Henry, A. Yaushev, P. Taranenko // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – IEEE, 2018. – P. 1-6. (Scopus).
9. Taranenko, P. Development of a Digital Twin of the Mechanical Part of Coriolis Flowmeters Based on Frequency Response Functions / P. Taranenko, D. Telegin, A. Yaushev // 2018 Global Smart Industry Conference (GloSIC). – IEEE, 2018. – P. 1-6. (Scopus).
10. Яушев, А.А. Разработка методики диагностики смещения нуля кориолисового расходомера, вызванного условиями его закрепления / А.А. Яушев, П.А. Тараненко // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практической конференции №2. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 97-101.

Диссертант

А.А. Яушев

ЯУШЕВ Александр Анатольевич

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, СВЯЗЕЙ И ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОВЫШЕННЫЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСХОДОМЕРОВ
КОРИОЛИСОВОГО ТИПА

Специальность:

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук