

На правах рукописи

Крауиньш Дмитрий Петрович

**ДИНАМИКА ТАХОМЕТРИЧЕСКОГО
ШАРИКОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ РАСХОДА.**

Специальность: 01.02.06-Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ТОМСК-2002

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и роботизация в машиностроении» Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Нестеренко Владимир Прокопьевич

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Копытов Владимир Ильич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ТПУ

Дмитриев В.С.

кандидат технических наук,

доцент ТГАСУ

Ларионов С.А.

Ведущая организация: ОАО «МАНТОМЬ», г. Томск

Защита состоится « 24 » декабря 2002г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.01 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке университета по адресу: ул. Белинского, 53-а.

Автореферат разослан « 23 » ноября 2002г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.т.н., профессор

Кирсанов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Переход Российской Федерации к рыночной экономике требует принятия решительных мер по созданию условий для учета расхода материальных и энергетических ресурсов во всех отраслях хозяйственной жизни общества. Ресурсо и энергосбережение становятся основными направлениями современной технической политики. В плане реализации этой политики важнейшую роль приобретают приборы учета массы или объема нефти, воды, газа и других веществ, транспортируемых по трубам и потребляемых различными объектами.

Без этих приборов и этих измерений трудно наладить рыночные отношения, контролировать утечки и исключить потери ценных продуктов. Коммунальное хозяйство и промышленные предприятия испытывают большую нужду в этих счетчиках. По данным ВОЗ установка счетчиков позволяет снизить уровень потребления воды на 30 и более процентов.

Для проведения правильного коммерческого учета необходимо иметь надежные приборы со стабильными характеристиками.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Автоматизация и роботизация в машиностроении» Томского политехнического университета.

Целью работы является разработка и исследование тахометрического шарикового измерителя потока, имеющего повышенную работоспособность, точность и стабильность характеристик.

Методика выполнения работы Экспериментальные исследования проводились на лабораторных стендах, на высокоточном промышленном стенде с использованием электронно-измерительных приборов; на реальных объектах и калибровочных стендах.

В теоретической части использованы положения общей теории колебаний и устойчивости движения, теоретической механики и гидромеханики, с разработкой математической модели измерителя потока. Экспериментальные исследования по выявлению закономерностей поведения шара в камере проведены на физической модели шарикового преобразователя расхода, предполагающей отсутствие контакта шара с элементами кольцевой камеры с использованием стенда, оснащенного устройством стробоскопического импульсного освещения, оборудованного фотоприставкой и измерителем расхода. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с основными положениями теории движения тел, находящихся в потоке жидкости.

Научная новизна

- В работе исследованы и обоснованы параметры первичного преобразователя расхода, обеспечивающие бесконтактное вращение шара, увеличивающие работоспособность и стабильность их характеристик.
- Впервые созданы математические и физические модели измерительных вставок с расширенными зазорами между шаром и стенками камеры, обеспечивающие бесконтактное движение в камере только в радиальном или только в осевом направлениях кольцевой камеры.

- Для существующих приборов впервые показано, что причина потери точности и стабильности характеристик обусловлена трением и нерегулярным колебанием шара на принудительно заданной траектории.
- Разработаны конструкции с принципиально новой геометрией канала в соответствии с исследованиями, защищенные патентами РФ.

Практическая ценность. Основные результаты работы дают возможность использования теоретических и экспериментально определенных параметров для создания следующих приборов:

- Высокочувствительных измерителей потока жидкости с узким диапазоном измерения, работающих в бесконтактном режиме, с высокостабильной линейной характеристикой, которые можно использовать в системах управления контурами стабилизации расходов.
- Создание измерителей потока с широким диапазоном расходов, со стабильной статической характеристикой, работающих в бесконтактном режиме, которые можно использовать для измерения больших расходов, в том числе с использованием делителей потока.

Реализация работы. Приборы защищены патентами РФ №№ 2066847, 2066848 и свидетельствами на полезную модель №№ 1531, 22236.

- Некоторые типы преобразователей в составе приборов для измерения расхода холодной воды, теплосчетчиков (СШ-1М, ТСШ-1М) прошли государственные испытания на утверждение типа средств измерений и вошли в Государственный реестр средств измерений: прибор СШ-1М прошел метрологические испытания и внесен в Госреестр под № 14366-94, а теплосчетчик ТСШ-1М внесен в Госреестр средств измерения за №15559-96.
- Приборы СШ-1М и ТСШ-1М серийно выпускаются на ООО «Конто» (г. Томск).
- По результатам исследований разработаны стационарные датчики расхода для технологических установок ратификации и дезодорации масла в ООО «Провансаль» (г.Томск).

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и получили положительную оценку специалистов на 2-й и 7-й областных научно-практических конференциях молодёжи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям, прошедшей в 1995г. и 2001г. в г. Томске; на 3-ем семинаре «Организация коммерческого учета энергоносителей» прошедшем в 1995г. в г. Санкт-Петербурге, а также на научных семинарах кафедры «Автоматизация и роботизация в машиностроении» Томского политехнического университета.

Публикации. По данной работе опубликовано 10 работ (в том числе получено 2 патента и 2 свидетельства на полезную модель).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа представлена на 133 странице текста, включает 56 иллюстраций, фотографий и профилограмм, а также 1 таблицу и акты внедрения. Список литературы состоит из 89 наименований.

Основные положения представленные к защите:

1. Механизм потери точности и стабильности характеристик преобразователя расхода и шара в контактном режиме.
2. Экспериментальное и теоретическое обоснование необходимости бесконтактного вращения шара в потоке.
3. Математическая модель преобразователя расхода, позволяющая установить параметры, обеспечивающие бесконтактное вращение шара в потоке жидкости.
4. Результаты экспериментальных исследований по реализации бесконтактной модели преобразователя расхода.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы и цель диссертационной работы, изложены состояния науки и техники по шариковым тахометрическим преобразователям расхода, определены задачи исследований, основные положения, которые выносятся на защиту.

Первая глава посвящена состоянию вопроса и постановке задачи диссертационной работы.

Рассмотрены и проанализированы широко применяемые в промышленности и коммунальном хозяйстве разновидности счетчиков жидкости. Отмечается, что к счетчикам предъявляется ряд требований, наиболее важные из которых: надежность точность измерений и большой диапазон контролируемых расходов. Отмечается связь положений вихревой струйной техники (вихревых диодов) с тахометрическим шариковым измерителем потока. Отмечено, что в камере существует распределение тангенциальной и нормальной скоростей потока, а, следовательно, и гидростатического давления. На рис.1 показано распределение тангенциальной скорости потока и соответствующего ему распределение гидростатического давления характерное для вихревых камер, причем точка экстремума по мере роста расхода жидкости смещается в сторону периферийного диаметра вихревой камеры. При помещении в вихревую камеру «инородного тела» – шара, могут возникнуть некоторые дополнительные факторы.

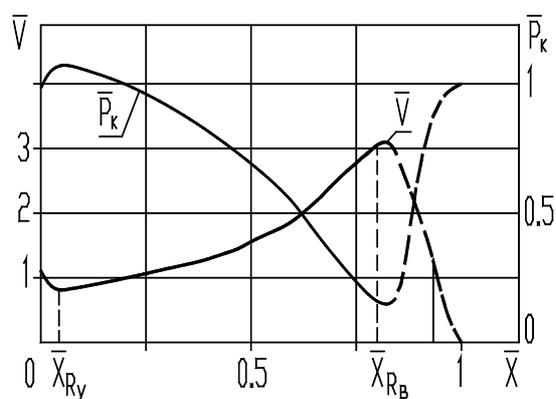


Рис.1

Проведенный анализ работ и конструкций тахометрических приборов показал следующее:

1. Не существует преобразователя расхода, обеспечивающего одновременно все предъявляемые к расходомерам требования по долговечности, точности, большому диапазону измеряемых расходов.

2. Все известные схемы ориентированы на наличие однотоочечного или двухточечного контакта шара с элементами камеры и предполагают, что путем выбора малых зазоров между шаром и элементами камеры, а также расположением этой камеры на фиксированном радиусе, обеспечивается линейность характеристики. Это положение не позволяет избежать снижения точности, работоспособности и потери стабильности характеристик, вызванных износом шара и камеры.

На основании этих выводов сформулирована общая цель исследования:

Разработка теоретических и практических предпосылок для создания шариковых тахометрических расходомеров со стабильной статической характеристикой, работающих в бесконтактном режиме движения шара по орбите.

Частными задачами исследования являются:

1. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния геометрических параметров камеры и шара на основные свойства преобразователей расхода.

2. Определение параметров преобразователя расхода, влияющих на улучшение статической характеристики зависимости частоты вращения шара от расхода ($f(Q)$) и отклонение передаточного коэффициента прибора - зависимость объема жидкости, приходящейся на один оборот шара от расхода ($\Delta W/N(Q)$) и повышения его чувствительности.

3. Выявление связи геометрических параметров: камеры и шара, и характеристик потока с износом элементов преобразователя расхода, а также взаимосвязи между износом и стабильностью характеристик.

4. Исследование измерительной вставки преобразователя расхода, с существенно увеличенными радиальными зазорами, позволяющими шару находится на орбите, радиус которой определяется балансом сил действующих на шар.

5. Экспериментальное исследование измерительной вставки преобразователя расхода, в которой кольцевая камера с шаром имеет существенно увеличенные осевые зазоры между шаром и торцами вихревой и кольцевой камер, позволяющие самоустанавливаться шару по высоте в осевом направлении и обеспечивающие при балансе сил его бесконтактное движение. Исследование условий, необходимых для возникновения бесконтактных режимов движения шара по орбите, и устойчивость колебаний шара при движении по орбитам.

Во второй главе статистически исследуются различные параметры шарикового преобразователя расхода жидкости с тангенциальным подводом и аксиальным выходом измеряемой среды и их влияние на требования, предъявляемые к счетчикам. К таким параметрам относятся: плотность (масса $M_{ш}$) и диаметр шара, наружный (D_1) и выходной диаметры или радиусы ($R_в$) вихревой камеры и ее высота (H), геометрические размеры тангенциальных каналов (h, b_l) и их количество (n), угол входа (радиус входа R или R_y (как на рис.1)) тангенциальных каналов, технология изготовления полого шара (из двух

половинок, соединенных лазерной сваркой) и ряд других факторов. Упрощенная схема такого преобразователя показана на рис.2 (разрез для указания расположения тангенциальных каналов сделан в горизонтальной плоскости по оси шара).

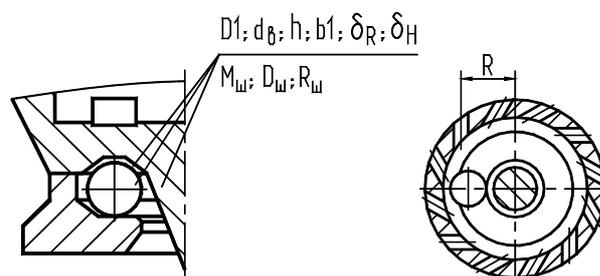


Рис.2

В результате исследований делаются следующие выводы:

1. Анализ результатов тарировочных испытаний измерительных вставок изготовленных методом объемного прессования, с шаром, выполненным по отработанной технологии (штамповка, шлифовка, лазерная сварка, закатка сварного шва), показал, что характеристика приборов не стабильна и зависит от малых отклонений массы шара Δm и его эксцентриситета; незначительных отклонений высоты Δh и ширины Δb_1 тангенциальных окон, а также и внутреннего диаметра камеры ΔD_1 и других параметров. Поэтому, возникла необходимость в калибровке приборов по следующей схеме – изготовление, разбраковка шаров (по массе и по наличию дисбаланса), сборка, измерение, «зашивка» характеристики в память прибора (определение характерных точек, запоминание их, аппроксимация точек кривой, запись в требуемой форме с возможностью передачи на электромеханический либо электронный счетчик). В процессе их эксплуатации происходит износ шара и элементов измерительной вставки, что приводит к необходимости внепланового поверочного контроля прибора с заменой измерительной вставки, либо его перепрограммирования.

2. Малые зазоры δ_R обеспечивают на стадии выпуска приборов хорошую линейность в широком диапазоне расходов, но при этом такой прибор становится весьма чувствительным к засорению дорожки его вращения, а значит, это приводит к значительному износу шара и элементов измерительной вставки и, соответственно, изменению статических характеристик.

3. В процессе эксплуатации в зависимости от геометрии камеры происходит различный износ шара и кольцевой камеры. Износ шара в зависимости от его удельной плотности и диаметра, также параметров камеры приводит к его различному износу – равномерное уменьшение диаметра, износу по многограннику или износу с кольцевым пояском. В таких изношенных приборах при эксплуатации наблюдался значительный акустический шум, что свидетельствует о наличии поперечных и осевых колебаний со стенками камеры.

4. Наблюдения за работой приборов с шариковым преобразователем, работающих на различных промышленных установках в качестве датчиков обратной связи для регулирования расходов в узком диапазоне, показали, что при

определенных параметрах камеры (увеличенных зазорах) и шара существуют режимы, в которых при длительной эксплуатации (более 10000 часов) практически отсутствует износ шара и измерительной вставки. В этих приборах не наблюдается также и акустический шум. Это свидетельствует о возможном наличии режима бесконтактного движения шара в камере.

В третьей главе излагаются результаты экспериментальных и теоретических исследований поведения шара в свободной в радиальном направлении камере шарикового преобразователя расхода жидкости. Модель позволяет прогнозировать поведение измерительной вставки преобразователя расхода и выявить влияние основных параметров вихревой камеры вставки, массы шара, его диаметра и радиуса вращения на возникновение режимов бесконтактного движения шара в вихре потока и необходимый вид суммарной силовой характеристики для реализации требуемого закона статической характеристики.

Вводятся параметры функциональной модели рассматриваемого прибора. В ходе экспериментов фиксировались частота вращения шара f , радиус вращения шара $R_{ш}$, расход Q а также при стробоскопическом освещении делались снимки положения шара в камере, такие, например, как показанные на рис.3.

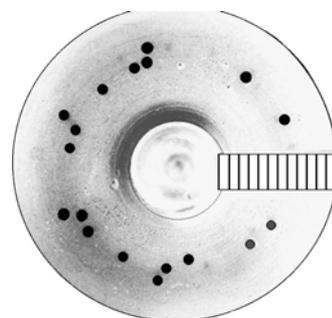


Рис.3

Поскольку шар обтекается потоком жидкости, то его тангенциальная скорость отстает от тангенциальной скорости потока V_τ на величину принятую называть скольжением - η . Тогда тангенциальная скорость шара $V_{\tau ш}$ равна:

$$V_{\tau ш} = V_\tau(1-\eta). \quad (1)$$

Находясь на данной орбите вращения, шар обтекается, также радиальным потоком V_n , который также изменяется в зависимости от радиуса орбиты вращения шара $R_{ш}$ при неизменном расходе.

Исследование показало, что существует достаточно широкая область орбит в радиальном направлении, находясь в которой шар устойчиво сохраняет данную орбиту, а при изменении величины потока переходит на соседнюю, устойчивую орбиту.

Наименьший износ шара возможен, если шар совершенно не контактирует с поверхностями кольцевой камеры. Это возможно при нахождении шара в положении гидродинамического равновесия всех взаимодействующих факторов и параметров. Баланс сил показанный на рис.4(а). Схематично это можно также представить в виде шара находящегося в положении равновесия под действием пружин, установленных с разных сторон и испытывающее некоторое вязкое трение K_V . Такая схема представлена на рис.4(б). При изменении нагрузки с той или другой стороны с противоположной стороны должна возникнуть адекватная

реакция. Если нет пульсирующих факторов или идет медленное изменение нагрузки, то и резких пульсаций скорости вращения шара не должно быть.

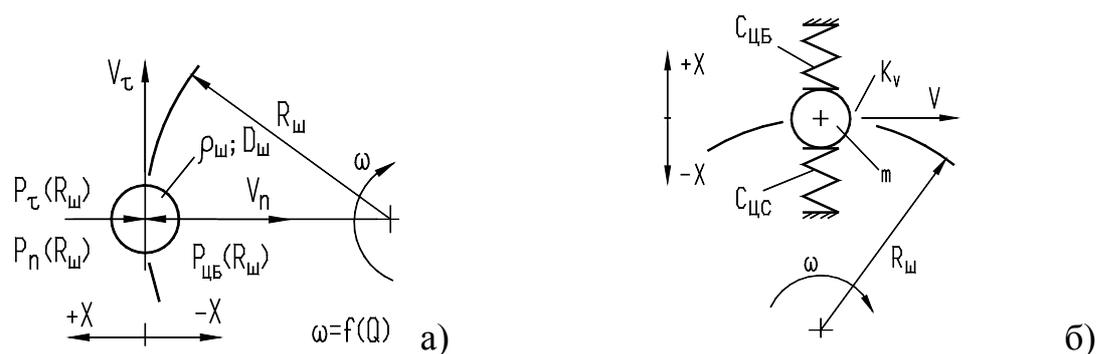


Рис.4

В главе 2 определены статические характеристики преобразователей расхода, согласно которым каждому значению расхода соответствует определенное значение частоты вращения шара. Но т.к. радиус орбиты вращения шара R_w в базовой измерительной вставке и некоторых существующих схемах, рассмотренных в главе 1 постоянен, то каждому значению расхода соответствует определенная скорость вращения шара и этот закон – всегда линейный. Если радиус вращения шара будет переменным, то возможно должен быть другой закон пропорциональности.

На рис.4(б) показано: $C_{цс}$ – жесткость гидродинамической пружины от совокупного действия всех центростремительных сил, $C_{цб}$ – жесткость гидродинамической пружины от совокупного действия всех центробежных сил. Однако, все эти силы (гидродинамические пружины) являются функцией геометрических параметров камеры и одновременно зависят от малых отклонений шара от заданной потоком радиуса орбиты или высоты «всплытия».

Рассмотрим основные факторы, формирующие силы, со стороны потока, действующие на шар при его движении по орбите радиуса R_w при данном расходе.

Одним из факторов, формирующих силы, действующие на шар, является тангенциальная скорость потока V_τ . Показанное на рис.1 распределение тангенциальной скорости V_τ означает, что в кольцевом канале по радиусу R_i имеется сложное распределение статических давлений, характер распределения которого приведен на этом же рисунке. Это статическое давление приблизительно определяется на данном радиусе зависимостью:

$$p_\tau(R_w) \approx p_0(R_{max}) - f(V_\tau(R_w)), \quad (2)$$

в которой $p_0(R_{max})$ - давление на периферии камеры, $f(V_\tau(R_w))$ - скоростной напор созданный тангенциальным потоком на данном радиусе вращения шара. Следовательно, т.к. шар имеет определенный радиус $D_w/2$, то находясь на орбите радиуса R_w распределение давления на участке D_w приводит к появлению интегральной силы P_τ . Это первый фактор из группы сил, действующих на шар, со стороны потока с расходом Q .

Вторая интегральная сила обусловлена наличием радиальной составляющей скорости в вихревой камере. В соответствии с законами обтекания удобообтекаемых тел, лобовое сопротивление обтеканию определяется как:

$$P_n = C_n \cdot F_{ш} \cdot \rho_{ж} \frac{V_n^2}{2}, \quad (3)$$

где $C_n \approx 0,8$ – коэффициент лобового сопротивления для шара.

Т.к. радиальную составляющую скорости потока V_n на любом произвольном радиусе можно определить через расход Q и площадь поверхности цилиндра, образованную радиусом R_i и некоторой интегральной высотой камеры H_i через которую проходит радиальный поток, то тогда величина V_n может быть определена на данном радиусе, как:

$$V_n = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot H_i}, \quad (4)$$

то, измеряя радиус орбиты при данном расходе можно приближенно рассчитать величину силы P_n . Расчетная зависимость P_n от радиуса R_i для исследуемой камеры приведена на рис.5(а).

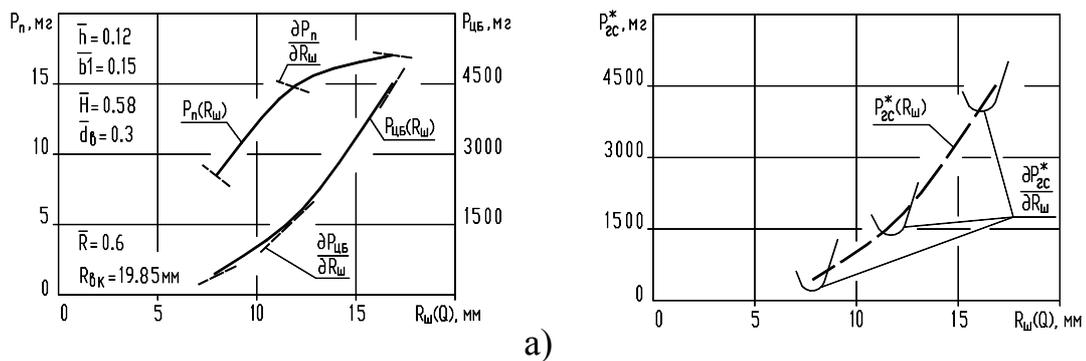


Рис.5. Расчетные зависимости P_n , $P_{цб}$ и $P_{зс}^*$ от радиуса $R_{ш}$.

Третьим фактором, влияющим на характер сил, измерение которых, как и их учета влияния сил, обусловленных распределением гидростатического давления, являются силы, связанные с вращением шара вокруг собственной оси. С одной стороны при отсутствии эксцентриситета и точным значением распределения $V_r(R_i)$ можно было бы рассчитать угловую скорость шара и учесть это движение в локальной точке потока в момент, когда в этой радиальной точке находится шар. Однако наличие эксцентриситета масс приводит к тому, что вектор угловой скорости шара в потоке $V_r(R_i)$, меняет свою ориентацию. Следовательно, в каждой локальной точке при движении шара по орбите возникает собственный пограничный слой, со своим собственным случайным распределением давления.

Одним из факторов, возмущающих орбитальное движение шара со стороны потока, является неравномерное распределение тангенциальной скорости потока при совместном движении шара и потока. Вследствие неравномерности распределения этой скорости по сечению шара он может вращаться в потоке при

движении по орбите вокруг собственной оси. Наличие эксцентриситета масс приводит к тому, что при вращении возникает знакопеременная, не ориентированная возмущающая сила, а также при движении шара по орбите возникает собственный локальный пограничный слой, со своим собственным распределением давления по поверхности шара.

Исследования орбитальной скорости вращения шара при движении в камере показывают, что шар имеет скорость близкую к тангенциальной скорости потока, поэтому уровень сил, связанный с обтеканием шара и его вращением вокруг собственной оси будет иметь малый порядок по сравнению с ранее указанными факторами, обусловленными обтеканием шара радиальным потоком и наличием распределенного статического давления по радиусу камеры.

Сам шар, вращаясь с орбитальной скоростью, близкой к V_τ ($V_\tau(R_{ui})$ применительно к шару) создает центробежную силу, равную:

$$P_{цб} = (\rho_{ш} - \rho_{ж}) \cdot W_{ш} \cdot \frac{V_\tau^2}{R_{ш}}, \quad (5)$$

Зависимость 5 в ряде работ показывает, что центробежная сила во вращающемся потоке жидкости данной плотности $\rho_{ж}$ может быть центробежной, если $\rho_{ш} > \rho_{ж}$ и центростремительной, если $\rho_{ш} < \rho_{ж}$. Наши наблюдения за поведением шара разной плотности во вращающемся потоке подтверждают справедливость этой зависимости.

Для определения $P_{цб}$ из эксперимента известны – f_i , R_{ui} и расход Q . Учитывая, что $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_i$, можно определить эту центробежную силу. При плотности шара больше плотности жидкости силы направлены от центра к периферии кольцевой камеры. Расчетная зависимость сил $P_{цб}$ от радиуса приведена на рис.5(а).

Так как визуальные наблюдения за поведением шара на орбите вращения при стробоскопическом освещении показали, что существуют режимы движения, когда орбита стационарна $R_{ui} = const$. В этом случае шар «удерживается» равенством «нулю» выявленных групп сил. Баланс сил можно записать:

$$P_{цб}(R_{ui}) + P_\tau(R_{ui}) + P_n(R_{ui}) \equiv 0, \quad (6)$$

При стробоскопическом наблюдении за поведением шара на орбите было выявлено, что шар на большинстве стационарных орбит не имеет постоянного значения радиуса орбиты $R = R_0 \pm \Delta x$, где R_0 - радиус круговых орбит, Δx – амплитуда симметричных колебаний шара. В режиме движения шара по уравнению 6 участвуют силы вязкого сопротивления, зависящие от скорости колебания шара относительно стационарной орбиты и инерционные силы, обусловленные ускорением при колебательном движении шара массой $m_{ш}$ относительно той же стационарной орбиты.

В данном случае уравнение 6 можно записать:

$$m_{ш} \cdot \frac{d^2 R_{ui}}{dt^2} + K_v \cdot \frac{d R_{ui}}{dt} + P_{цб}(R_{ui}) + P_\tau(R_{ui}) + P_n(R_{ui}) = F^x(t) \quad (7)$$

На рис.4(а) приведена зависимость сил обтекания шара $P_n(R_{ш})$ и центробежных сил $P_{цб}$ от радиуса стационарной орбиты. На кривых $\frac{\partial P_n}{\partial R_{ш}}$ и $\frac{\partial P_{цб}}{\partial R_{ш}}$ показаны значения изменения этих сил при наличии колебаний шара X относительно стационарной орбиты. На рис.5(б) приведены расчетные зависимости гидростатических сил $p_{гс}^*(R_{ш})$, полученные из уравнения 6 для стационарной орбиты радиуса $R_{ш}$. Фактические значения гидродинамической силы от радиуса $R_{ш}$ изображены на рис.5(б) в виде кривой $\partial p_{гс}^*(R_{ш})$. Характер изменения этой кривой $\frac{\partial p_{гс}^*(R_{ш})}{\partial R_{ш}}$ в зависимости от $R_{ш}$ оценен по результатам публикаций, приведенный в главе 1. Силы обтекания шара $P_n(R_{ш})$ направлены к центру камеры, а центробежные $P_{цб}(R_{ш})$ - к периферии камеры.

Первые два слагаемых в уравнении динамики обусловлены тем, что шар приобретает дополнительное движение относительно потока, а, следовательно, возникают инерционные силы и силы вязкого сопротивления при наличии этого дополнительного движения. Дополнительная внешняя возмущающая сила, как показали наблюдения за стационарными стробоскопическими портретами, зависит от количества каналов ввода. При этом возникает дополнительное движение в радиальном направлении, которое не синхронизируется с циклической частотой прохождения шаром участков входных окон при движении по орбите. Приведенный выше анализ групп сил действующих на шар, позволил выявить, что экспериментально, без организации специальной дорогостоящей экспериментальной установки, можно определить только две компоненты ($P_{цб}(R_{ш})$ и $P_n(R_{ш})$) из трех, присутствующих в уравнении 6. Не представляет труда также определение коэффициента K_v .

Для дальнейшего анализа уравнения 7 перепишем его в отклонениях X относительно стационарной орбиты $R_{ш}$:

$$m_{ш} \cdot \frac{d^2(R_{ш} + X)}{dt^2} + K_v \cdot \frac{d(R_{ш} + X)}{dt} + P_{цб}(R_{ш} + X) + P_{\tau}(R_{ш} + X) + P_n(R_{ш} + X) = F(t). \quad (8)$$

Каждая из компонент сил в этом уравнении может быть при малом отклонении от стационарной орбиты $R_{ш}$ представлено разложением в ряд и заменено отклонениями в первом приближении.

С учетом этого уравнение динамики окончательно можно записать:

$$m_{ш} \cdot \frac{d^2 X}{dt^2} + K_v \cdot \frac{dX}{dt} + \left(\frac{\partial P_{цб}}{\partial X} + \frac{\partial P_{\tau}}{\partial X} + \frac{\partial P_n}{\partial X} \right) \cdot X = F(t). \quad (9)$$

Решение данного дифференциального уравнения зависит от значений коэффициентов ($m_{ш}$, K_v и $(\frac{\partial P_{цб}}{\partial X} + \frac{\partial P_{\tau}}{\partial X} + \frac{\partial P_n}{\partial X} = C_{\Sigma})$), а также от возмущающего воздействия $F(t)$. Если все коэффициенты в левой части уравнения постоянны и положительны, то в зависимости от величины возмущающего воздействия $F(t)$,

обусловленного цикличностью окон входа потока в камеру могут наблюдаться резонансные явления. При положительных постоянных коэффициентах уравнения 9 резонанс может возникнуть только при совпадении частоты возмущения с собственной частотой колебаний шара:

$$\omega_{ш} = \sqrt{\frac{C_{\Sigma}}{m_{ш}}}. \quad (10)$$

Исследования обтекания шара потоком показывают, что коэффициент лобового сопротивления:

$$K_v = \frac{\partial P_n}{\partial V} = C_n \cdot F_{ш} \cdot \rho_{ж} \cdot V_n(R_{ш}) \quad (11)$$

положителен и значителен по величине. Где $V_n(R_{ш})$ - радиальная скорость шара от действия радиальной составляющей скорости потока. Поэтому демпфирование шара в потоке существенное и, следовательно, амплитуда колебаний при резонансе не может достичь значительных величин.

Исследование стробоскопических портретов при разных расходах показали, что радиальные колебания шара незначительны и зависят от расхода.

Уравнение 9 можно привести к стандартному виду разделив все члены уравнения на C_{Σ} :

$$\frac{m_{ш}}{C_{\Sigma}} \cdot \frac{d^2 X}{dt^2} + \frac{K_v}{C_{\Sigma}} \cdot \frac{dX}{dt} + X = \frac{F(t)}{C_{\Sigma}} \quad (12)$$

или

$$T^2 \ddot{X} + 2 \cdot \xi \cdot T \dot{X} + X = F^*(t), \quad (13)$$

где $T^2 = \frac{1}{\omega_*^2}$ - постоянная времени, а ξ - коэффициент демпфирования.

Из уравнений 12 и 13 получается, что

$$\frac{K_v}{C_{\Sigma}} = 2 \cdot \xi \cdot T = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{m_{ш}}{C_{\Sigma}}},$$

откуда

$$\xi = \frac{K_v}{2 \cdot \sqrt{m_{ш} \cdot C_{\Sigma}}}.$$

В технических системах для оценки резонансных свойств обычно принимают коэффициент динамичности $K_{\partial} = \frac{1}{2 \cdot \xi}$.

Запишем значение выражения для определения коэффициента динамичности K_{∂} через параметры поперечных (радиальных) колебаний шара при движении по орбите

$$K_{\partial} = \frac{\sqrt{m \cdot C_{\Sigma}}}{K_v}. \quad (14)$$

Коэффициент вязкого сопротивления может быть определен из экспериментальных данных.

Если принять, что для большинства динамических систем имеющих вязкое сопротивление коэффициент динамичности равен $K_D = 3...5$, то можно произвести оценку суммарной жесткости и определить в линейном приближении собственную частоту для шара, движущегося по орбите и имеющего радиальную вибрацию.

Рассчитанное по экспериментальной зависимости значение резонансной частоты $\omega_{ш}^*$ лежит за пределами области экспериментальных значений циклической частоты $n \cdot \omega$, что для линейного приближения означает отсутствие резонанса.

Так как K_V может быть определено из уравнения 11, то из анализа экспериментальных данных и данных литературных источников можно в линейном приближении установить $\xi = 0,3...0,4$. Тогда можно полностью определить C_Σ и соответственно $\omega_{ш}$.

Однако в некоторых режимах наблюдалась потеря шаром устойчивости. Анализ литературы проведенный в главе 1 показал, что $V_\tau(Ri)$, а следовательно и гидростатическое давление P_{zc} имеет в данной определенной камере в зависимости от расхода Q экстремум, который по мере увеличения расхода смещается в направлении к периферии камеры. Тогда сумма коэффициентов разложения сил в ряд может быть переменной:

$$C_\Sigma = \frac{\partial P_{цб}}{\partial X} + \frac{\partial P_\tau}{\partial X} + \frac{\partial P_n}{\partial X} = \text{var}$$

Так как $\frac{\partial P_{цб}}{\partial X} > 0$ всегда, при принятых обозначениях $X > 0$ если R увеличивается, а, соответственно, $\frac{\partial P_n}{\partial X} < 0$ также всегда, то единственным фактором существенно влияющим на нестабильность суммы C_Σ , является фактор скорости вихревого потока $V_\tau(Ri)$ и соответственно $P_{zc}(Ri)$ обусловленное этим потоком.

Проведенное исследование математической модели по уравнению 9 листинг программы которой приведен в приложении показал, что при определении функций $P_{цб}(R)$ и $P_n(R)$ как не экстремальных функций (соответственно $\frac{\partial P_{цб}}{\partial X} > 0$, а $\frac{\partial P_n}{\partial X} < 0$), и функции $P_\tau(R)$, как функции имеющей экстремум, можно наблюдать различные проявления автоколебательных режимов.

В том случае когда $C_\Sigma > 0$, но переменна, всегда на модели наблюдаются малые стационарные колебания с не ярко выраженными резонансными режимами. Следовательно, при рациональном выборе зоны бесконтактного орбитального движения шара для данного диапазона частот, можно избежать его контакта со стенками камеры, а также возникновение неустойчивых режимов, в

которых радиус орбиты движения шара совпадает с радиусом экстремума характеристики $P_{\Sigma}(R_{in})$.

Если принять, что суммарная характеристика имеет вид:

$$P_{\Sigma}(X) = C \cdot (1 - nn \cdot X + mm \cdot X^2) \cdot X, \quad (16)$$

то варьируя коэффициентами nn и mm данного уравнения, а также начальными параметрами жесткостью C , массой шара m и коэффициентом вязкости жидкости K_v , можно подобрать коэффициенты nn и mm , а, следовательно, полностью определить значение суммарной силовой характеристики $P_{\Sigma}(X)$ вид которой для разных коэффициентов и параметров потока и шара представлен на рис.6 в полном соответствии с данными стробоскопических экспериментов (например, снимок, приведенный на рис.2 соответствует рис. 6(б)) и расчетной моделью.

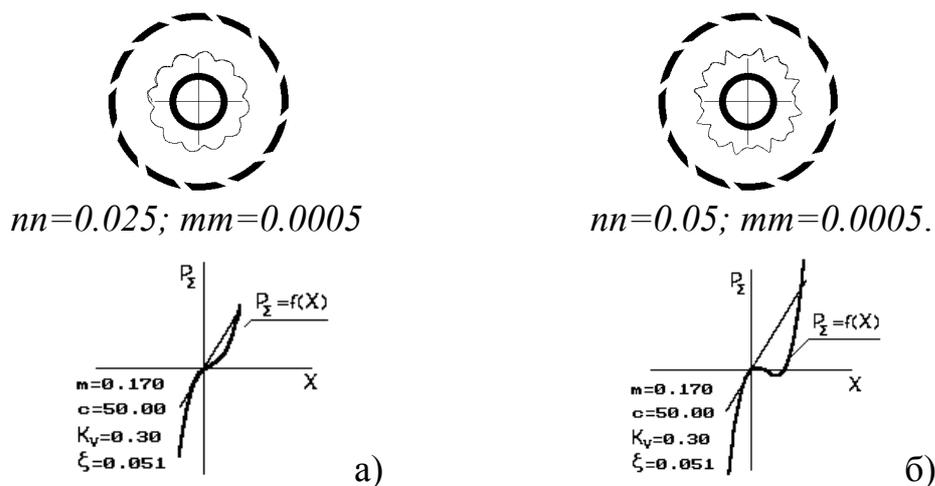


Рис.6

Таким образом:

1. Шар при изменении расхода стремится занять такое положение в широкой камере, при котором в невозмущенном режиме при отсутствии контакта со стенками камеры обеспечивается баланс всех сил действующих на него как со стороны потока, так и центробежных.

2. Наличие тангенциальных каналов ввода жидкости, равномерно расположенных по периферии вихревой камеры с определенным углом входа, приводит к появлению возмущающей силы с частотой, определяемой количеством каналов и частотой вращения шара по орбите при данном расходе.

3. При определенных условиях и зависимостях суммарной силы, действующей на шар, возмущенное движение на стационарной орбите может быть устойчивым, тогда вид силовой характеристики соответствует случаю, когда $C_{\Sigma}(X) > 0$. В этом случае собственное движение, при наличии малого демпфирования с течением времени затухает и шар колеблется на орбите с малой амплитудой, обусловленной цикличностью, проходя шаром тангенциальных каналов и зон, в которых нет прямого воздействия струи на шар.

4. Для определенных участков радиуса орбиты шара, на которых в кольцевой камере располагается максимум тангенциальной скорости потока (минимумы гидростатического давления) возможно появления неустойчивости стационарной

орбиты из-за того, что на малом участке суммарной силовой характеристики $P_{\Sigma}(X)$ могут появиться участки с отрицательным наклоном $C_{\Sigma}(X) < 0$. Если для данного шара радиальные размеры камеры с учетом возросшей амплитуды автоколебаний таковы что в этих режимах шар не может достичь стенки, то бесконтактное движение сохраняется.

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования возможности создания бесконтактного шарикового расходомера, в котором камера бесконтактного взаимодействия шара с вихрем расположена перпендикулярно по отношению к вихревой камере. В главе 4 рассматриваются также причины возникновения подъемной силы при обтекании шара потоком жидкости. Когда подъемная сила превышает вес шара, то последний всплывает в камере по высоте и стабилизируется в новой точке.

При различных сочетаниях геометрических параметров на экспериментальной установке фиксировались показания частоты вращения шара расхода, времени наполнения и объема и наблюдалось в стробоскопическом освещении поведение шара в камере. Полученные по зафиксированным показаниям f и Q зависимости дополнялись зафиксированным во время экспериментов параметром $R_{ш}$.

В области безразмерных координат положений радиусов вращения шара $\bar{X} = 0.45...0.55$ наблюдается всплытие шаров и обнаружено падение частоты вращения шара вверху камеры в $1,25...1,3$ раза для используемой в экспериментах геометрии, а, следовательно, должна существовать обратная квадратичная зависимость по распределению гидростатического давления.

В результате экспериментов при определенном сочетании параметров было обнаружено в диапазоне частот вращения шара $3...30 Гц$ наличие ярко выраженной подъемной силы и полное поднятие относительно тяжелого шара наверх кольцевой камеры. Причем это характерно для шаров с относительной плотностью шара в пределах $1.2...2.8$. Интересным представляется то, что при относительной плотности

равной единице не наблюдалось постоянной ярко выраженного зависания шара в камере, шар пульсировал по всей высоте камеры. Помимо этого при определенном сочетании параметров камеры, на некоторых режимах в момент подъема шара в узкой камере было обнаружено отсутствие у шара контакта с радиальными стенками кольцевой камеры. Эти экспериментальные данные – зависимость высоты подъема шара $h_{ш}$ от частоты его вращения f – приведены на рис.7. Шар поднимался плавно, без пульсаций шара, как по высоте, так и по

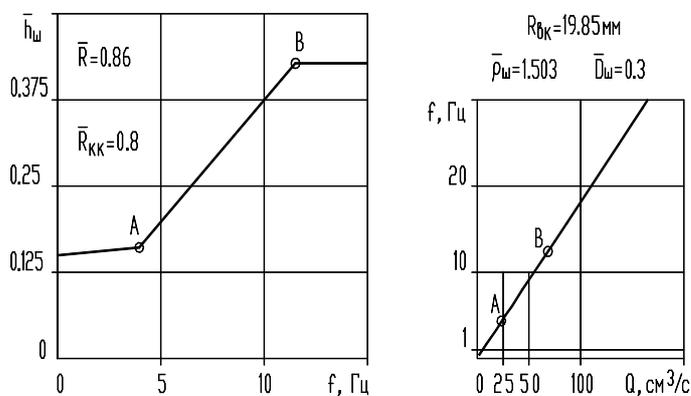


Рис.7

радиальному зазору камеры составлявшему величину $\delta_R=3\text{мм}$, а при уменьшении расхода также плавно снижался. Общий бесконтактный диапазон по расходам составляет около 4. Но на очень малых частотах вращения шара (менее 3Гц) практически нулевые силы взаимодействия шара и камеры и ими можно пренебречь. В этом случае можно говорить о гарантированном минимальном износе преобразователя расхода в диапазоне расходов $Q_{max}/Q_{min}=20$.

Эти данные, несомненно, можно объяснить перераспределением суммарных скоростей и давления, возникающих при подъеме шара вследствие его обтекания потоком, как в вертикальной плоскости вращения, так и в радиальной плоскостях.

Входной поток, воздействуя на шар, приводит его к движению по окружности радиусом $R_{ш}$ и при наличии контакта с опорной поверхностью возникает собственная частота вращения шара $\omega_{ш}$. Происходит перераспределение относительных и абсолютных скоростей потока и шара. В точке контакта повышается статическое давление, а вверху понижается, и шар постепенно всплывает. Распределение тангенциальных скоростей потока по высоте камеры выравнивается.

Основываясь на теоретических исследованиях, проведенных в *главе 3* и экспериментальных исследованиях проведенных для кольцевой камеры, расположенной перпендикулярно по отношению к вихревой камере, можно выделить следующие силы, влияющие на положение и характер поведения шара в камере:

1. Сила «тяжести», обусловленная относительной плотностью шара $\bar{\rho}$ – $\Delta G = \Delta m_{ш} \cdot g$. Эта сила, при горизонтальном расположении вихревой камеры и вертикальном расположении кольцевой всегда постоянна и направлена в сторону нижнего или верхнего торца камер.

2. Силы, связанные с гидростатическим давлением, распределенным по радиусу кольцевой камеры, которые воздействуют на шар, как в радиальном, так и вертикальном направлениях. Возникновение этих сил вызвано тем, что жидкость при движении по линиям тока, образует в вихревой и, частично, в вертикальной кольцевой камерах как тангенциальный, так и радиальный поток, и соответствующее этому распределение гидростатического давления. Так как на каждом радиусе камер и на каждой высоте расположения шара имеется своя тангенциальная и радиальная скорость потока, то в соответствии с закономерностями течения жидкости в вихревых камерах, выражение для силы в общем виде можно записать - $P_{2c}(V_n, V_\tau, R, h)$.

3. Пульсирующая часть гидростатического распределения давления по высоте и радиусу кольцевой камеры бесконтактного взаимодействия шара с вихрем, обусловлено, как отмечено в *главе 3*, циклическостью окон и также будет зависеть от радиуса расположения шара и высоты его «всплытия» - $\Delta P_{2c}(V_\tau, V_n, h, R)$.

4. Гидростатическим распределением давления в зонах перехода потока из вихревой камеры в кольцевую $P_{kk}(V_i, \frac{S_k}{S_{ex}}, R_0)$ и наоборот в радиальном

направлении $P_2(V_i, \frac{S_k}{S_2}, R_2)$. Эти две составляющие определяются геометрией перехода потока из вихревой камеры в общую часть P_{kk} и наоборот когда поток из общей кольцевой камеры, в которой находится шар, переходит в выходную часть вихревой камеры P_2 .

5. Подъемная сила от действия несимметричного обтекающего потока, обусловленного распределением радиальной и тангенциальной составляющей скорости потока по высоте высокой, узкой кольцевой камеры - $P_{нод}(V_\tau, V_n, h, R)$. Подъемная сила, действующая на шар, включает многие составляющие сил действующих на шар. В нашем случае, это часть сил, возникающих вследствие несимметричного расширения потока при выходе из вихревой камеры и переходу в общую часть вихревой и кольцевой камер. Линии тока в этом случае на развертке располагаются под некоторым углом атаки к горизонтальной линии развертки орбиты шара.

6. Центробежные силы, обусловленные тангенциальной составляющей скорости потока и массой шара - $P_{цб}(V_\tau(H;R), m_{ш})$.

Уравнение динамики для вертикальной плоскости движения шара можно записать:

$$m_{ш} \cdot \frac{d^2Y}{dt^2} + K_v \cdot \frac{dY}{dt} + \left(\frac{\partial P_{цб}}{\partial Y} + \frac{\partial P_\tau}{\partial Y} + \frac{\partial P_n}{\partial Y} + \frac{\partial P_{нод}}{\partial Y} \right) \cdot Y = F^y(t). \quad (17)$$

В данной работе для вертикальной кольцевой камеры приводится, лишь теоретический анализ закономерностей изменения сил, действующих на шар после того, как он при данном расходе «зависает» в осевом направлении на некоторой высоте, вращаясь по некоторой, устойчивой в радиальном направлении, орбите. Отклонение от этой координаты обозначено в *уравнении 17*, координатой Y .

Таким образом, в результате проведенных исследований:

- экспериментально определено, что при определенном сочетании параметров происходит всплытие шаров с относительной плотностью $\bar{\rho} = 1,2...3$ и их устойчивое бесконтактное со стенками камеры вращение в кольцевой камере, что возможно только при равенстве (балансе) сил, действующих на шар. Это положение учтено при составлении математической модели поведения шара на орбите в вертикальной плоскости;

- эксперименты показали, отсутствие положения, при котором возможно бесконтактное вращение шара с относительной плотностью $\bar{\rho} = 1$, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, что существенно для того чтобы в потоке по вертикальной координате под действием архимедовой силы или силы тяжести могла существовать такая точка по высоте, где достигается баланс сил. Это положение также учтено в принятой модели. Такой шар движется по орбите камеры хаотично со значительной величиной пульсации в обеих плоскостях. При этом величина $\pm \Delta X = \pm b/2$, а величина $\pm \Delta Y = \pm (H - D_{ш})/2$;

- в зависимости от положения среднего радиуса кольцевой камеры, радиуса входа тангенциальных каналов, и относительной плотности шара возможно получение больших или меньших диапазонов измерения расхода. Статическая характеристика прибора, в этом случае, линейна и стабильна, а движение шара в камере, как в радиальном, так и вертикальном направлениях при наличии устойчивых колебания шара вокруг стационарной орбиты, происходит без контакта со стенками камеры.

Поскольку были определены параметры, при которых гарантированно происходит бесконтактное вращение шара можно определить и силы, действующие в этот момент на шар. Т.к. система находится в равновесии бесконтактно, то определение величины сил можно свести к силе тяжести и подъемной силе, возникающей в результате обтекания шара тангенциальным потоком – в вертикальной плоскости и некоторой долей центробежной составляющей силы, смещающей шар в радиальном направлении.

В приложении описаны экспериментальные и промышленные установки, спроектированные в процессе работы по данному направлению и приведены листинги программ имитационной и математической моделей.

В заключении сказано:

Изучены статические характеристики измерительных вставок шариковых преобразователей расхода жидкости. Выявлено для различных конструкций измерительных вставок влияние геометрических параметров камеры и шара на вид характеристики прибора и его энергетические параметры при условии, что чувствительный элемент контактирует с кольцевой камерой.

Экспериментально показано отсутствие в исследуемом диапазоне влияния пульсаций потока на заданную погрешность показаний шарикового преобразователя расхода жидкости в конфигурации параметров имеющих зазоры (радиальные и осевые) не более $1/3$ от диаметра шара.

Разработана математическая модель шарикового преобразователя расхода на основе его структурного анализа с учетом бесконтактного вращения шара.

Экспериментально изучены геометрические и силовые параметры бесконтактной модели шарикового преобразователя расхода жидкости. Для исследуемой модели измерительной вставки диапазоны бесконтактных расходов замеряемого с помощью визуального контроля положения шара в стробоскопическом освещении составили не менее $3...4$, а с учетом контактов в зоне минимального износа – не менее 10 . Полученные результаты позволяют использовать их при проектировании тахометрических датчиков расхода с минимальным износом.

Выявлено отсутствие у шара с относительной плотностью равной 1 точки баланса сил при движении в потоке жидкости и имеющего с камерой зазоры равные $(1/3...1/2)D_{ш}$.

Экспериментально изучена возможность использования унифицированного измерителя в типоразмерном ряде с одинаковыми диапазонами расходов.

Основные положения опубликованы в работах:

1. Крауиньш Д.П., Бригадин А.Г., Косенчук Н.Н., Панов А.В. Разработка шариковых счетчиков воды//Тезисы докладов 2-ой областной научно – практической конференции молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям. Томск, 1995. с.5.
2. Крауиньш Д.П., Гольдшмидт М.Г., Косенчук Н.Н., Панов А.В. Шариковые счетчики//Материалы 3-го семинара «Организация коммерческого учета энергоносителей» г. Санкт-Петербург, 1995. С.24...25.
3. Крауиньш Д.П. Исследования шариковых расходомеров//Тезисы докладов Всероссийской научно – технической конференции (Computer-Based Conference). Методы и средства измерений. Часть – 2. Нижний Новгород: Верхне – Волжское отделение Академии технологических наук Российской Федерации, 2000. С30..31.
4. Крауиньш Д.П., Гольдшмидт М.Г. Разработка и исследование шариковых расходомеров//Сборник трудов «Механика и машиностроение» Томского политехнического университета. Томск, 2000. С.204...206.
5. Крауиньш Д.П. Анализ влияния параметров потока и шара на работоспособность шарикового первичного преобразователя расхода жидкости//Сборник докладов технологического конгресса «Современные технологии при создании продукции военного и гражданского назначения». Омск: Издательство ОмГТУ, 2001. Ч.1 С.363...366.
6. Крауиньш Д.П. Шариковые преобразователи расхода жидкости повышенной надежности//Тезисы докладов 7-ой областной научно – практической конференции молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям. Томск, 2001. с.136...137.
7. Патент РФ №2066847. Расходомер жидкости или газа //Крауиньш Д.П., Бригадин А.Г., Гольдшмидт М.Г., Косенчук Н.Н., Панов А.В. – Бюл. №26 1996г.
8. Патент РФ №2066848. Тахометрический расходомер//Крауиньш Д.П., Бригадин А.Г., Гольдшмидт М.Г., Косенчук Н.Н., Панов А.В. – Бюл. №26 1996г.
9. Свидетельство на полезную модель №1531. Преобразователь расхода//Крауиньш Д.П., Бригадин А.Г., Гольдшмидт М.Г., Косенчук Н.Н., Панов А.В. – Зарегистрировано в Госреестре полезных моделей 16 янв. 1996г.
10. Свидетельство на полезную модель №22236 Тахометрический расходомер//Крауиньш Д.П., Гольдшмидт М.Г.– Зарегистрировано в Госреестре полезных моделей 10 марта 2002г.

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага ксероксная.

Плоская печать. Усл.печ.л. 5,35. Уч.-изд.л. 4,84.

Тираж . Заказ .Цена свободная.

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.94.

Типография ТПУ. 634034. Томск, пр. Ленина, 30.