

22 4/5/136-

**Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Государственный технический университет имени Н.Э.Баумана**

На правах рукописи

УДК 681.121

БОЙКО Андрей Владимирович

**ТУРБИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ РАСХОДА
ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА**

**Специальность 05.13.05 - Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления**

Аннотация
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1990

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском институте теплоэнергетического приборостроения.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Камышев Л.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Попов Д.Н.,

кандидат технических наук, доцент Архипов А.В.

Ведущая организация:

Московское научно-производственное объединение "Нефтеавтоматика"

Защита состоится "17" мая 1990 г. в ауд. _____
в _____ час. _____ мин. на заседании специализированного Совета
К 053.15.06 Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской
Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственного
технического университета им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, г.Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5.

Отзывы по данной работе (в двух экземплярах, заверенные
печатью учреждения) просим направлять по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

___199___ г.

А.И.Макошмов



М 491136

0 экз. Зак. 360

Актуальность. Рост потребностей страны в нефтепродуктах и природном газе может быть удовлетворен только широким развитием ресурсосберегающих технологий. Особенно высокая потребность в контрольно-измерительных приборах для работы в информационно-измерительных подсистемах систем управления технологическими процессами с использованием агрессивных сред. Это нашло отражение в директивных документах ЦК КПСС и СМ СССР по развитию нефтяной и газовой промышленности в Западном Казахстане. Сложность создания приборов для измерения расхода и количества попутного нефтяного газа обусловлена высокой агрессивностью газа, содержание сероводорода в котором до 25%, давление меняется в процессе измерения от 0,1 до 0,6 МПа, температура от 5 до 60°C.

Анализ различных методов измерения расхода показал, что наиболее полно предъявляемым требованиям удовлетворяют приборы турбинного типа с опорами вращения в виде подшипников качения.

Несовершенство существующих турбинных преобразователей расхода (ТПР); отсутствие и экономическая нецелесообразность создания расходомерных установок для агрессивных газов; отсутствие критериев, определяющих выбор геометрических параметров датчиков расхода (ДР), вызвали необходимость развития теории ТПР газа и проведения научных исследований.

Цель работы. Разработка типоразмерного ряда приборов измерения количества высокоагрессивного попутного нефтяного газа и создание алгоритмов расчета их градуировочных зависимостей в условиях эксплуатации.

Основные задачи исследования. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие научные задачи.

1. Разработать физическую и математическую модели процесса измерения расхода газа турбинным методом.

2. Исследовать влияние различных, в том числе геометрических и технологических факторов на работу ТПР газа.

3. Создать методику рационального выбора геометрических параметров новых приборов.

4. Создать методику расчета градуировочных зависимостей ТПР газа для широкого спектра эксплуатационных условий.

Методы исследования. В работе использовался математический аппарат регрессионного анализа, математической статистики, а также использовались положения метрологии, аэро- и гидродинамики, в том числе теории пограничного слоя.



Научная новизна. Разработана математическая модель градуировочной зависимости ТПР газа. Получено аналитическое выражение измерительной зависимости.

Определено влияние на градуировочную зависимость различных геометрических параметров и технологических факторов, что позволило более точно оценивать их значимость.

Разработана методика расчета градуировочных зависимостей для условий эксплуатации, учитывающая единственную индивидуальную градуировочную зависимость конкретного прибора.

Разработана методика проверки адекватности математической модели экспериментальным данным, обеспечивающая достоверность проверки при ограниченном числе макетных образцов.

Разработана методика проектного расчета.

Практическая ценность. На основании полученных в диссертационной работе результатов разработан типоразмерный ряд турбинных счетчиков попутного нефтяного газа СПГ. В 1988 году счетчики СПГ успешно прошли Государственные контрольные испытания, рекомендованы к серийному производству и занесены в Государственный реестр средств измерений (№ 11810-89). Счетчики СПГ выпускаются Ивано-Франковским ПО "Промприбор". Экономический эффект от внедрения счетчиков СПГ достигнут за счет повышения точности измерения нефтяного попутного газа по сравнению со счетчиками АГАТ и составляет 3,9 тыс.руб. на I изделие.

Апробация. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции "Развитие системы метрологического обеспечения измерения расхода и количества веществ" (г.Казань, ВНИИР, 1984), на семинаре в МДНТИ (г.Москва, 1988), на НТС НИИтеплоприбора (1988), на научном семинаре кафедры "Автоматические установки" МТУ им.Н.Э.Баумана (1990) и на семинарах в салонах "Приборы и вычислительная техника" городов Ленинграда (1986), Львова (1987), Таллина (1988). Автор за разработку счетчиков СПГ удостоен бронзовой медали ВДНХ СССР (№ 63746, 1986).

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 15 печатных изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка использованных источников, 5 приложений и содержит 130 страниц машинописного текста, 70 рисунков, 10 таблиц, 107 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены различные методы измерения расхода газа и показано, что турбинный метод измерения является наиболее перспективным для применения в установках переработки нефтяного попутного газа. Турбинные приборы характеризуются малогабаритностью, высокими точностью и повторяемостью показаний, работоспособностью в широком диапазоне температур.

В первом разделе дается обзор работ, посвященных ТПР. Отмечено, что наибольший вклад в развитие теории турбинных расходов внесли работы Бошняка Л.Д. и Бызова Л.Н., Бобровникова Г.Н. и Камышева Л.А., Томпсона и Грея, Ли и Карлби, из исследований ТПР газа наиболее значительны работы Ли и Ивенса.

Анализ проблем теории и практики конструирования ТПР газа показал, что до настоящего времени опорам вращения не уделялось достаточного внимания несмотря на то, что они влияют на линейность градуировочной зависимости, ресурс работы и надежность в эксплуатации. Радиальные шарикоподшипники имеют малые моменты трения и предпочтительны для использования в ТПР газа. Из модели усталостного разрушения подшипников следует, что наряду с предварительной приработкой в нормальных условиях и выбором марки смазки [1] снижение осевой нагрузки существенно повышает долговечность опор вращения ТПР. Известные схемы компенсации осевых усилий не реализуют потенциальных возможностей турбинного метода измерения и не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к счетчикам агрессивного нефтяного попутного газа. В работе предложена новая классификация схем компенсации осевых усилий на подшипники опор вращения [2]. Для счетчиков СПГ была разработана новая конструктивная схема [3] (см. рис.1). В приведенной схеме поток газа действует как на измерительную 2, так и на жестко связанные между собой компенсационную крыльчатку 4 и компрессорную турбинку 5. Вращаясь от компенсационной крыльчатки, компрессорная турбинка подает часть потока на глухой задний торец ступицы измерительной крыльчатки. Возникающее динамическое давление создает осевое усилие, направленное против действия основного потока газа. Тем самым обеспечивается компенсация осевого усилия на подшипники измерительной крыльчатки. Ресурс работы опор вращения увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с опорами вращения без компенсации. Компенсационная крыльчатка не искажает характера течения газа на измерительную крыльчатку,

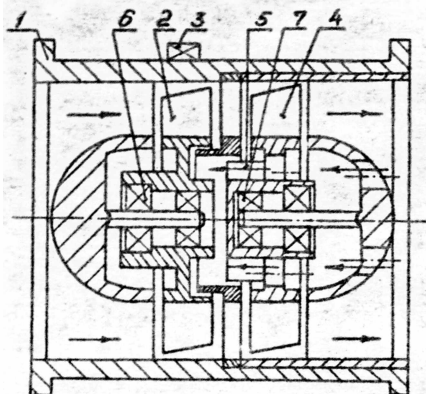


Рис.1. Схема ТПР с осевой разгрузкой подшипников измерительной крыльчатки

1 - корпус; 2 - измерительная крыльчатка; 3 - узел съема сигнала; 4 - компенсационная крыльчатка; 5 - компрессорная турбинка; 6 и 7 - подшипниковые узлы измерительной и компенсационной крыльчаток, соответственно.

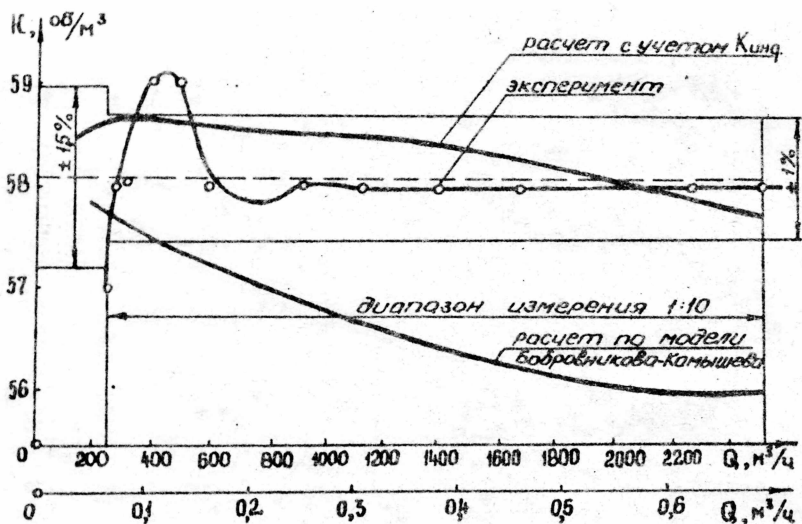


Рис.2. Зависимость градуировочного коэффициента ТПР газа (Ду=250 мм) от объемного расхода

что позволяет применять для расчетов известные элементы теории турбинных расходомеров и сравнивать результаты с исследованиями других авторов.

Во втором разделе описаны физическая и математическая модели турбинного метода измерения расхода газа. Допущения, принятые при построении модели, следующие: 1 - газ однородный, 2 - течение газа на решетку лопастей осесимметрично, 3 - поток среды установившийся, пульсации потока отсутствуют, 4 - лопасти крыльчатки имеют форму винтовой поверхности, 5 - сопротивление формы пренебрежимо мало, поскольку лопасти крыльчатки относятся к тонким, гладким и удлиненным симметричным аэродинамическим профилям. Рассмотрим правомочность принятых допущений.

Однородность - свойство большинства газов. Симметричность потока достигается установкой переднего струенаправляющего аппарата. Установкам переработки попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях свойственна высокая стабильность расхода. В работе [4] обоснованы приемлемость использования профиля в виде тонкой пластины с необработанными передними и задними кромками и правомочность применения винтовых крыльчаток.

Согласно уравнению изменения количества движения для крыльчатки, независимо от конструктивной схемы ТПР $I \cdot d\omega/dt = M_{дв} - M_c$, где I - момент инерции всех вращающихся масс узла крыльчатки; ω - угловая скорость вращения; $M_{дв}$ - движущий момент, действующий на крыльчатку; M_c - сумма моментов сопротивления вращению крыльчатки. Для установившегося движения крыльчатки $d\omega/dt = 0$ и уравнение принимает вид:

$$M_{дв} - M_c = 0. \quad (I)$$

Моменты $M_{дв}$ и M_c зависят от величины расхода, значений физических параметров среды и геометрических размеров. Уравнение (I) позволяет представить угловую скорость вращения крыльчатки и функции влияющих факторов. Определив каждый член, можно рассчитать градуировочную зависимость прибора. Момент $M_{дв}$ рассчитывают по методу "подъемных сил" и на основании уравнения Эйлера. В первом методе используются коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы, зависящие от угла атаки. Достоверное аналитическое выражение зависимости угла атаки от радиуса r получить практически невозможно. Значения угла атаки всего несколько градусов и незначительные ошибки в его определении приводят к существенной погрешности расчета $M_{дв}$.

На основании уравнения Эйлера и с учетом реальной диаграммы скоростей газа в сечении кольцевого канала перед крыльчаткой после интегрирования элементарного движущего момента по всему сечению крыльчатки получено выражение для $M_{дв}$:

$$M_{дв} = \frac{4\pi^2 Q^2 (K_{ид} f_{\Delta} - K)}{F} \int_{R_{вт}}^{R_{н}} \frac{\rho k_v \tau^3}{1+\eta} d\tau, \quad (2)$$

где Q - расход среды; ρ - плотность среды; K - градуировочный коэффициент ТПР; $K_{ид}$ - градуировочный коэффициент идеализированного ТПР; k_v - коэффициент распределения скорости среды по сечению кольцевого канала ТПР; η - конструктивный коэффициент; f_{Δ} - коэффициент учета протечек среды через радиальный зазор; F - площадь проходного сечения крыльчатки в отсосительном движении; $R_{н}$ и $R_{вт}$ - наружный и втулочный радиусы крыльчатки. При числах Маха менее 0,15 газ можно считать несжимаемым, т.е. плотность по всему проходному сечению крыльчатки практически постоянна, включая и пограничный слой вблизи основания лопастей [5]. В уравнении (2) выведем плотность из-под знака интеграла и обозначим символом J_1 интеграл $\int_{R_{вт}}^{R_{н}} \frac{k_v \tau^3}{1+\eta} d\tau$, тогда

$$M_{дв} = 4\pi^2 \rho Q^2 J_1 (K_{ид} f_{\Delta} - K) / F. \quad (3)$$

Вычислить определенный интеграл J_1 можно, зная функциональные зависимости $k_v(\tau)$ и $\eta(\tau)$. Влияние коэффициента η на интеграл J_1 несравнимо меньше, чем влияние коэффициента k_v . Это позволяет в первом приближении принимать $\eta = 0$. Для определения k_v необходимо знать закон распределения скоростей в кольцевом канале $V_a(\tau)$. В общем случае V_a зависит от геометрических размеров канала, режима течения и свойств измеряемой среды. Малейшая эксцентricность труб кольцевого канала заметно влияет на однородность профиля скорости, что лишает смысла попытки вычисления k_v с высокой точностью. Зависимости, применяемые для описания эпюры скоростей в трубе достаточно хорошо описывают эпюру скоростей в кольцевом канале ТПР, поскольку передний обтекатель не обеспечивает формирование эпюры скоростей, характерной для бесконечно протяженного кольцевого канала. В работе [6] показано, что использование формулы М.Д. Миллионщикова позволяет упростить процедуру и повысить достоверность расчета k_v . Получено аналитическое выражение коэффициента f_{Δ} .

Известные методики расчета коэффициента k_v не учитывают влияния втулки ТПР, поэтому они тем точнее, чем меньше втулочное отношение $d_{вт} = R_{вт}/R_n$. Для ТПР газа характерны большие значения этого параметра. В общем случае средняя скорость эквивалентного потока не совпадает со скоростью реального потока в кольцевом канале ТПР. Расход эквивалентного потока $Q_{эkv}$ больше действительного расхода Q на величину расхода $Q_{доб}$, приходящуюся на центральную часть сечения трубопровода, ограниченную втулкой ТПР, т.е. $Q_{эkv} = Q + Q_{доб}$. Используя соотношение для средней скорости среды в трубопроводе $V = Q_{эkv}/(\pi R_k^2)$, получим $V = Q(1-\gamma)/(\pi R_k^2)$, где $\gamma = Q_{эkv}/Q$ - коэффициент влияния втулки ТПР. Опустив промежуточные выкладки аналитического вывода, приведем коэффициент γ в окончательном виде:

$$\gamma = (2,5 + \operatorname{arctg} C - 3 \ln C) / \{2,5 - 2\tau_{вт} - 0,5\tau_{вт}^2 - C(\tau_{вт}^2 - 1) \times \\ \times \operatorname{arctg}[C(1 - \tau_{вт})] + 0,5(\tau_{вт}^2 - 3) \ln[C^2(1 - \tau_{вт})^2 + 1]\} - 1.$$

Здесь $\tau_n = R_n/R_k$, $\tau_{вт} = R_{вт}/R_k$ - значения наружного и втулочного радиусов крыльчатки в безразмерном виде, а C - постоянная для конкретного прибора величина, зависящая от коэффициента гидравлического трения λ . Сравнительный расчет показал, что неучет втулки у счетчиков СПГ приводит к ошибке не менее 3,3%.

С учетом формулы М.Д.Миллионшикова получаем:

$$J_1 = R_k^4 \operatorname{Re}_* C^{-1} [(\tau_n^4 - \tau_{вт}^4)/(16C) + (\tau_n^3 - \tau_{вт}^3)/(6C) + (3C^2 - 1)(\tau_n^2 - \tau_{вт}^2)/(8C^3) + (C^2 - 1)(\tau_n - \tau_{вт})/C^3] + [(5C^4 - 10C^2 + 1)/(8C^5)] \ln[C^2(1 - \tau_n)^2 + 1]/(C^2(1 - \tau_{вт})^2 + 1) - [1/(8C)]\{\tau_n^4 \ln[C^2(1 - \tau_n)^2 + 1] - \tau_{вт}^4 \ln[C^2(1 - \tau_{вт})^2 + 1]\} + [(C^5 + 3C^3 + 4C^2 - 4)/(4C^4)]\{\operatorname{arctg}[C(1 - \tau_n)] - \operatorname{arctg}[C(1 - \tau_{вт})]\} + (1/4)\{\tau_n^4 \operatorname{arctg}[C(1 - \tau_n)] - \tau_{вт}^4 \operatorname{arctg}[C(1 - \tau_{вт})]\}.$$

Для решения уравнения (3) остается определить M_c . Его основные составляющие: M_n - момент трения в опорах вращения; M_d - момент сил вязкостного трения среды о торцевые поверхности крыльчатки; M_z и $M_{лаб}$ - моменты сил сопротивления, в радиальных зазорах между крыльчаткой и внутренней поверхностью корпуса, между цилиндрическими выступами крыльчатки и проточками направляющих аппаратов, соответственно; $M_{ж}$ - момент сил вязкостного трения о поверхность лопастей в межлопастных каналах. Исследования трения в опорах вращения ТПР газа приведены в работе [7]. Для ТПР жидкости, так и для ТПР газа граничные значения чисел Рейнольдса, соответствующие сменам режимов течения, существенно отличаются от граничных значений для ТПР жидкостей. Анализ экспериментальных градуировочных зависимостей ДР ($D_y = 25 - 250 \text{ мм}$)

показал, что малая плотность газов, высокая степень турбулизации потока вращающейся решеткой лопастей, большое скольжение крыльчатки относительно потока приводят к значительно меньшим значениям критических чисел Рейнольдса, соответствующих концу ламинарного и началу турбулентного режимов течения на лопастях крыльчатки. По данным Ли и Карлби эти значения составляют $5 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^5$. Для ТПР газа получены значения $(1-2) \cdot 10^4$ и $(2-5) \cdot 10^4$ [8]. При числах Рейнольдса $(5,5-8) \cdot 10^4$, а это обычно имеет место при расходах $Q > Q_{max}$, наблюдается уменьшение градуировочного коэффициента, что очевидно вызвано проявлением шероховатости лопастей. При $Re \geq Re_{кр.3}$ хорошее совпадение дает формула $[C_f]_{шр} = \alpha Z (1,89 + 1,62 l_g (\ell/k_s)^{-2,5})$, где $\alpha = 0,06-0,18$ - коэффициент влияния лопастей, Z - число лопастей, ℓ - длина хорды лопасти, k_s - эквивалентная песочная шероховатость.

Влияние моментов сопротивления вращению крыльчатки на градуировочную зависимость ТПР представлено через скольжение крыльчатки относительно потока Sk . Параметр Sk представляет собой количественную оценку разницы между реальной (ω) и идеальной ($\omega_{ид} = 2\pi f_{\Delta} Q / (TF)$) скоростями вращения крыльчатки $Sk = (\omega_{ид} - \omega) / \omega_{ид}$, где T - винтовой шаг крыльчатки, или

$$Sk = (K_{ид} f_{\Delta} - K) / (K_{ид} f_{\Delta}). \quad (4)$$

Из уравнения (3) с учетом зависимостей (1) и (4) следует

$$Sk = M_c / (4\pi^2 \rho Q^2 J_1 f_{\Delta} / (TF^2)). \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет исследовать влияние каждой составляющей M_c на градуировочную зависимость ТПР, выявлять причины нелинейности градуировочной зависимости и намечать пути их устранения. Скольжение представлено как сумма составляющих от моментов сопротивления $Sk = Sk_i (M_c)$. Анализ показывает, что в области малых расходов (до $0,4 Q_{max}$) наибольшее влияние на градуировочную зависимость оказывает трение в опорах вращения и в лабиринтных уплотнениях. В области расходов более $0,4 Q_{max}$ преобладающее влияние оказывает трение о поверхности лопастей в межлопастных каналах. Окончательное выражение градуировочной зависимости:

$$K = (1 - Sk) K_{ид} f_{\Delta}. \quad (6)$$

Особенностью ТПР газа является проявляющееся через трение в опорах вращения влияние давления p и температуры T_K на градуировочную зависимость, которая представлена в виде

$$K = (1 - Sk^*) K_{ид} f_{\Delta} - M_{п} \int \rho_0 / (2\pi R^2) (T_{K0} / T_K) (p / p_0) (1/m^2),$$

где Sk - сумма скольжений от трения в опорах вращения, $\int$ - ко-

коэффициент сжимаемости газа, ρ_0 - плотность газа при условиях градуировки, m - массовый расход газа, R - средний радиус лопасти. Для условий градуировки

$$K_0 = (1 - Sk_0^*) K_{ид} \rho_0 - M_n \xi \rho_0 / (2\pi R^2) (1/m^2).$$

Величины Sk и Sk_0 практически равны между собой в широком диапазоне давлений и температур. Приведенные уравнения позволяют с высокой точностью рассчитывать градуировочные зависимости для любых значений p и TK , если известна хотя бы одна экспериментальная зависимость, например, для условий градуировки.

Третий раздел посвящен экспериментальному исследованию ТПР газа. Исследования условно разделены на три части: 1 - предварительные исследования для обоснования выбранного метода измерения и принятых допущений; 2 - исследования влияния на градуировочную зависимость конструктивных и технологических факторов, физических параметров измеряемой среды; 3 - эксперименты, подтверждающие адекватность теоретической модели.

Метрологические испытания ТПР, в том числе макетных, экспериментальных и промышленных образцов счетчиков СИП проводились на расходомерных установках: ОДУ-3600 (ПО "Брянскоблгаз", г.Брянск), РКДУ-0,44 (ПО "Промприбор", г.Ивано-Франковск), РУТ-0,8 (НИИтеплоприбор, г.Москва), образцовой установке фирмы Ромбах-Рокуэлл (МЦСМ Госстандарта, г.Москва), воздушной вентиляционной установке (ОЗ "Нефтегазавтоматика", г.Бугульма).

Исследованиями подтверждена возможность обеспечить при турбинном методе измерения погрешность $\pm 1\%$ в диапазоне 1:10 рациональным выбором геометрических параметров крыльчатки.

Одним из основных геометрических параметров, влияющих на градуировочную зависимость, является шаг $T = 2\pi r \tan \beta$, где β - угол установки лопасти на радиусе r , причем $\beta = f(r)$. К крыльчаткам с переменным шагом относятся крыльчатки с плоскими лопастями, установленными под углом к набегающему потоку. Сравнительные эксперименты [4] с крыльчатками, имеющими различные законы изменения шага $T = T(r)$, показали, что предпочтительными являются крыльчатки с винтовыми и плоскими лопастями, причем крыльчатки с плоскими лопастями могут успешно конкурировать с винтовыми. Диапазон измерения у приборов с косыми лопастями при нелинейности $\pm 0,5\%$ оказался даже больше (1:9 с винтовыми, 1:10 с плоскими лопастями). Таким образом для ТПР технологических установок переработки природного газа наиболее предпочти-

тельными являются крыльчатки с винтовыми лопастями.

В экспериментах по определению влияния формы кромок лопастей на метрологические характеристики приборов [4] испытывались лопасти, полученные методом фрезерования (необработанные кромки), со скругленными входными кромками, со скругленными входными и выходными кромками и с заостренными входными кромками. Нелинейность градуировочной зависимости у крыльчаток с винтовыми лопастями в диапазоне 1:7 $\delta = \pm(0,45-0,99)\%$. У крыльчаток с плоскими лопастями в диапазоне 1:8 составила $\delta = \pm(0,32-0,67)\%$. Причем, минимальная нелинейность – у крыльчаток с необработанными кромками, а максимальная – у крыльчаток со скругленными входными и выходными кромками. Аналогичные результаты получены у крыльчаток с переменным по радиусу шагом.

Известные исследования показывают, что с увеличением радиального зазора градуировочный коэффициент повышается. Анализ градуировочной зависимости дает прямо противоположный результат. Это связано с тем, что увеличение радиального зазора получено авторами (в частности Бобровниковым Г.Н. и Камышевым Л.А., Теном и Факухой) за счет уменьшения высоты лопасти, что приводит к уменьшению площади "живого" сечения крыльчатки F и других конструктивных параметров. Для исключения связанных с этим искажений были проведены экспериментальные исследования. Различные величины зазора создавались изменением проходного сечения корпуса, при этом узел крыльчатки оставался неразбираемым. Полученные зависимости имеют эквидистантный вид. Существенных расхождений расчетных и экспериментальных данных нет.

Использование высокопроизводительных технологических процессов, таких как литье, требует расширенных допусков на изготовление. Эксперименты показали, что эксцентриситет установки крыльчатки в корпусе ТНР, который кроме уменьшения ресурса вследствие неравномерности нагружения опор вращения влияет на градуировочную зависимость, особенно в области малых расходов ($Q < 0,4 Q_{\max}$). Это отражается на диапазоне измерения.

Исследование влияния неуравновешенности узла крыльчатки на метрологические характеристики ТНР газа ($D_y = 100$ мм) показало, что увеличение дисбаланса снижает ресурс работы прибора и увеличивает нелинейность градуировочной зависимости. В экспериментах линейность градуировочной зависимости в диапазоне 1:10 при снижении величины дисбаланса с $0,93 \cdot 10^{-4}$ до $0,05 \cdot 10^{-4}$ Н·м увеличивалась с $\pm 2,36\%$ до $\pm 1,85\%$.

Исследования сопротивлений вращению в подшипниковых узлах [7] показали, что для расчета градуировочных зависимостей с высокой точностью момент M_{Π} целесообразно определять экспериментально для каждой пары подшипников. Для вывода эмпирической зависимости M_{Π} от значений влияющих факторов испытывались узлы с различным сочетанием типоразмеров шарикоподшипников. Варьировались угловая скорость вращения ω (рад/с) и осевое усилие N (Н). Обработка экспериментальных данных методами регрессионного анализа дает зависимость $M_{\Pi} = 2,43 \cdot 10^{-2} D_{\Pi \text{ ср}}^{1,83} N^{0,37} \omega^{0,22}$, где $D_{\Pi \text{ ср}}$ - среднее арифметическое значение наружных диаметров подшипников, мм. Максимальное расхождение расчетных значений моментов трения с экспериментальными не превышает 22%.

Применение консистентной смазки в приборах с D_y менее 150 мм противопоказано ввиду больших моментов сопротивления. У макета ДР $D_y = 100$ мм со смазкой ВНИИ НП-282 нелинейность градуировочной зависимости в диапазоне измерения 1:5 не лучше $\pm 10\%$, а с жидким маслом ВНИИ НП-50-1-4ф не превышает $\pm 1\%$.

Учет влияния количества смазки на градуировочную зависимость нецелесообразен. В экспериментах получено, что избыток смазки не приводит к заметному увеличению скольжения крыльчатки. В опоры вращения, смазанные ВНИИ НП-50-1-4ф, прибора ($D_y = 100$ мм), отработавшего 50 часов, была введена новая порция масла в количестве $3,5 \cdot 10^{-6}$ кг/шарик. Погрешность измерения в диапазоне 1:4 увеличилась незначительно с $\pm 0,54$ до $\pm 0,62\%$.

На точность измерения расхода турбинным прибором оказывает влияние кинематический коэффициент вязкости среды. Отсутствие расходомерных стендов с возможностью варьирования коэффициента в диапазоне от $5 \cdot 10^{-6}$ до $15 \cdot 10^{-6}$ м²/с (от 5 до 15 сСт) затрудняет возможность определения влияния вязкости на метрологические характеристики счетчиков СПГ. Для проведения испытаний была разработана установка. В качестве поверочных средств измерения использовались сопла Витшинского, Программа и методика испытаний опытных образцов счетчиков СПГ утверждена ВНИИ Расходомерии (г. Казань). Испытания заключались в следующем. В трубопровод последовательно со счетчиком СПГ устанавливалось сопло Витшинского, отградуированное на образцовой колокольной установке класса 0,3. Сличением показаний при различных давлениях газа (0,05–0,40 МПа, дискретность 0,05 МПа) определялись поправочные коэффициенты к показаниям счетчиков СПГ.

Испытания при различных значениях давления и температуры, обеспечивающих варьирование кинематического коэффициента вязкости в диапазоне $3,88 \cdot 10^{-6}$ – $27,78 \cdot 10^{-6}$ м²/с, показали, что его влияние на градуировочную зависимость меньше ($\pm 1,5\%$) чем паспортизованный класс точности счетчиков СИП ($\pm 2,5\%$). Это позволяет не нормировать дополнительные погрешности измерений. В четвертом разделе показано, что подтвердить адекватность математической модели можно, сравнив результаты расчетов с достаточно большой выборкой градуировочных коэффициентов. Статистическая обработка выборок градуировочных коэффициентов серийно выпускаемых приборов показала [8], что совокупность градуировочных коэффициентов подчиняется закону нормального распределения. Величина коэффициента вариации типоразмерного ряда меняется незначительно. Например, для обработанных выборок коэффициент вариации принимал значения от $1,94 \cdot 10^{-2}$ до $2,35 \cdot 10^{-2}$. Это позволило необходимое количество составить из макетов разных типоразмеров. Проверка адекватности математической модели результатам экспериментальных исследований была проведена на макетных образцах счетчиков СИП.

Пересчет значений градуировочных коэффициентов K_{ij} относительно математического ожидания $M_i(K_{ij})$ на значение K_{0j} относительно $M_0(K_{0j})$ проводился по формуле $K_{0j} = M_0 (1 + (K_{ij} - M_i)/M_i)$, где i и j – регистрационные номера типоразмера и макетного образца соответственно; 0 – принятый для сравнения базовый вариант. Проверка показала, что расхождение теоретических и экспериментальных градуировочных зависимостей статистически незначимо и предложенная математическая модель ТПР газа удовлетворительна для практического использования.

Для сужения области поиска рациональных сочетаний геометрических параметров предложены критерии проектирования. K_d – критерий нелинейности градуировочной зависимости [10] и E – критерий влияния вязкости среды на градуировочную зависимость ТПР [8]. Вид зависимости коэффициента сопротивления вращению диска от числа Рейнольдса $C_M = f(Re_d)$ идентичен зависимости $C_f = f(Re_\ell)$ для пластины. Чтобы смена режимов течения на торцевой поверхности крыльчатки и на ее лопастях не совпадала, не должны иметь место одновременно значения $Re_d = 3 \cdot 10^5$ и $Re_\ell = 0,15 \cdot 10^5$. Раскрыв содержание критериев, получаем, что безразмерное выражение $K_d = R_{вт} \sin \beta_d / (TS)$ должно отличаться от 20. Значения

критических чисел Re_e и Re_d для различных приборов достаточно "размыты", поэтому желательно, чтобы K_l отличался от приведенного значения на порядок. Таким образом, применение критерия K_l позволяет на стадии проектирования исключить из макетирования иррациональные сочетания геометрических параметров.

Замкнутая математическая модель градуировочной зависимости позволяет осуществить выбор геометрических параметров ТПР, наиболее полно отвечающих конкретным эксплуатационным условиям. Для этого можно пользоваться критерием $E^* = (K_{max}^{max} - K_{min}^{min}) / (K_{max}^{max} + K_{min}^{min})$, где надстрочный индекс показывает предельное значение вязкости, а подстрочный — предельное значение градуировочного коэффициента. Значения геометрических параметров ТПР газа, выбранные с применением E^* , обеспечивают минимальное изменение градуировочного коэффициента при изменении вязкости измеряемой среды. Для однозначности вычислений вместо критерия E^* можно использовать критерий $E = (K_{max}^{max} - K_{min}^{min}) / (K_{max}^{max} + K_{min}^{min})$. При этом K_{max}^{max} вычисляется при расходе, соответствующем концу ламинарной зоны ($Re_{e,кр.1}$), а K_{min}^{min} вычисляется в турбулентной зоне между $Re_{e,кр.2} = (2-5) \cdot 10^4$ и $Re_{e,кр.3} = (5,5-8) \cdot 10^4$.

Адекватность математической модели градуировочной зависимости ТПР подтверждается статистическим сравнением расчетных и экспериментальных градуировочных коэффициентов и идентичностью характера кривых. Зависимости, рассчитанные по предложенной методике, значительно ближе к экспериментальным данным, чем рассчитанные по модели Бобровникова Г.Н. и Камышева Л.А., разработанной для ТПР жидкости (рис.2). Индивидуальные значения геометрических размеров конкретного ТПР в большей степени влияют на среднее значение градуировочного коэффициента, а не на характер зависимости. После учета индивидуального геометрического фактора отличие расчетной и экспериментальной градуировочных зависимостей в диапазоне измерения $(0,1-1,0) Q_{max}$ не превышает $\pm 1\%$. Это хорошо согласуется с теоретической оценкой погрешности расчета, поскольку при пересчете градуировочных зависимостей с условий градуировки на условия эксплуатации систематическая ошибка в значительной степени учитывается.

Таким образом, математическая модель ТПР газа статистически адекватна экспериментальным данным, а расчеты по этой модели являются наиболее точными из известных.

Пятый раздел посвящен разработке методик и программ расче-

тов градуировочной зависимости ТПР газа, геометрических параметров ДР и компрессорной турбины. Разброс значений градуировочных коэффициентов в контрольной партии серийно выпускаемых расходомеров составил $\pm 7,59\%$. Отсюда – наиболее приемлем расчет с учетом особенностей конкретного ТПР, после подтверждения статистической незначимости расхождений расчетных и экспериментальных данных. В программе расчета ввод исходных данных осуществляется в диалоговом режиме, на экран дисплея выводится графическое изображение ТПР с обозначением размеров. Программа предназначена для эксплуатации на ЭВМ СМ-4.

Алгоритм проектного расчета основан на отборе сочетаний геометрических параметров, обеспечивающих минимальное изменение градуировочной зависимости во всем спектре эксплуатационных условий с использованием критериев Кл и Е.

Предложенный расчет геометрических параметров компрессорной турбины обеспечивает теоретически максимальную разгрузку опор вращения измерительной крыльчатки счетчиков СП.

В разделе рассмотрены пути совершенствования ТПР газа [11]. Для повышения метрологических и надежных характеристик приборов предложен новый способ контроля их работоспособности [12]. Выведенные соотношения между измерительными сигналами двухроторного ТПР позволяют судить о стабильности и линейности градуировочной зависимости непосредственно в эксплуатации. Для расширения области применения ТПР в составе массовых преобразователей расхода газа предложены новые конструктивные схемы [13,14], позволяющие повысить точность измерений.

В приложениях к диссертации приведены текст разработанной ФОРТРАН-программы расчета градуировочных зависимостей ТПР газа, расчет экономической эффективности внедрения счетчиков СП, дополнительные материалы по изобретениям, акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель градуировочной зависимости ТПР газа. Установлены значения критических чисел Рейнольдса, имеющие место при сменах режимов обтекания газом лопастей крыльчатки. Введен коэффициент влияния втулки ТПР.

2. Определено влияние на градуировочную зависимость геометрических параметров и технологических факторов: формы кромок лопастей, радиального зазора между корпусом и наружной поверхностью крыльчатки, несоосности установки и дисбаланса узла

крыльчатки, что позволило оценивать их влияние и значимость.

3. Экспериментальные исследования позволили получить аналитическую зависимость для определения моментов сопротивления пары подшипников качения.

4. Разработаны методика расчета градуировочной зависимости ТПР газа, учитывающая индивидуальную, полученную при выпуске из производства градуировочную зависимость, и методика проверки адекватности математической модели экспериментальным данным, которая подтвердила статистическую незначимость расхождений между расчетными и экспериментальными зависимостями.

5. Предложена методика проектного расчета, использующая критерии линейности градуировочной зависимости и влияния вязкости измеряемой среды. Методика позволяет выбирать значения геометрических параметров, рациональные для конкретных эксплуатационных условий. Эффективность предложенной методики проектного расчета подтверждена высокими метрологическими характеристиками счетчиков СПГ, для которых изменение физических параметров среды от градуировочных значений не приводит к дополнительным погрешностям, выходящим за класс точности прибора.

6. Предложены новый способ контроля работоспособности ТПР в эксплуатации, новые конструктивные схемы приборов для трубопроводов больших диаметров, приборов с компенсацией осевых усилий на подшипники измерительной крыльчатки, массовых преобразователей расхода, применяющих в своем составе ТПР.

Основные положения диссертации изложены в работах:

1. Бойко А.В., Камышев Л.А., Янбухтин И.Р. Особенности математического моделирования градуировочного коэффициента турбинных счетчиков газа / Перспективы развития методов и средств измерения расхода: Сб. науч. тр. НИИтеплоприбора, - М., 1985. - С. 68-72.

2. Турбинные счетчики попутного нефтяного газа СПГ / А.В.Бойко, И.Р.Янбухтин, В.Д.Кокорев, М.А.Новая // Измерение расхода и уровня в автоматизированных системах управления: Сб. науч. тр. НИИтеплоприбора, - М., 1988. - С. 10-18.

3. А.с. 1312392 СССР, МКИ 601F1/10. Турбинный расходомер / И.Р.Янбухтин, А.В.Бойко (СССР) // Открытия. Изобретения. - 1987. - № 19.

4. Бойко А.В., Янбухтин И.Р. К вопросу о влиянии геометрии лопастей на статическую характеристику газового расходомера

ра // Перспективы развития методов и средств измерения расхода: Сб. науч. тр. НИИтеплоприбора. - М., 1985. - С.72-79.

5. Бойко А.В. Элементы математической модели градуировочной характеристики турбинного расходомера газа // Деп. рук. ВИНТИ. - 1989. № 4648-пр-89, - 22 с.

6. Бойко А.В., Крикунов В.В. Повышение точности расчета градуировочных характеристик турбинных расходомеров газовых сред // Промышленные методы измерения расхода жидкости и газа: Сб. науч. тр. НИИтеплоприбора. - М., 1988. - С.45-50.

7. Бойко А.В., Канищев В.В. Исследование влияния опор вращения на градуировочные характеристики турбинных расходомеров газообразных сред // Измерение расхода и уровня в автоматизированных системах управления: Сб. науч. тр. НИИтеплоприбора. - М., 1988. - С.30-39.

8. Камышев Л.А., Бойко А.В. Пути улучшения метрологических характеристик турбинных расходомеров газовых сред / Метрологическое обеспечение средств измерения расхода, уровня, давления на стадии разработки, выпуска и эксплуатации: Сб. науч. тр. НИИтеплоприбора. - М., 1987. - С.24-34.

9. Бойко А.В., Янбухтин И.Р. Новые тахометрические приборы учета количества агрессивных газов // Приборы и системы управления. - 1988. - № 6. - С.22-26.

10. Бойко А.В., Янбухтин И.Р. Тенденции развития турбинных расходомеров // Автоматизация контроля загрязнения окружающей среды: Материалы семинара МДНТП, - М., 1988. - С.43-47.

11. А.с. 1527501 СССР, МКИ 601F1/10. Турбинный расходомер газа // А.В.Бойко, И.Р.Янбухтин (СССР) // Открытия. Изобретения. - 1989. - № 45.

12. Положительное решение на выдачу а.с. СССР от 25.12.89, МКИ 601F1/10. Способ контроля работоспособности двухроторного турбинного расходомера / А.В.Бойко, С.А.Золотаревский, И.Р.Янбухтин (СССР). - № 44924481-10(102726). Заявл. 01.07.88.

13. Положительное решение на выдачу а.с. СССР от 12.12.87, МКИ 601F1/00. Массовый расходомер / С.А.Золотаревский, И.Р.Янбухтин, А.В.Бойко (СССР). - № 4129886/24-07. Заявл. 08.10.86.

14. Положительное решение на выдачу а.с. СССР от 27.10.89, МКИ 601F1/10. Массовый расходомер / А.В.Бойко, С.А.Золотаревский, В.Д.Кокорев, А.А.Шкурин, И.Р.Янбухтин (СССР). - № 4674597/24-10 (049486). Заявл. 06.04.89.