

На правах рукописи

Гуськов Константин Викторович

**Исследование и разработка системы измерения расхода
газообразного рабочего тела для испытательного стенда
электроракетного двигателя**

**Специальность 05. 07. 05. – Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов**

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



Калининград – 2009

Работа выполнена в Российском государственном университете им.
И. Канта и в Федеральном государственном унитарном предприятии
опытное конструкторское бюро “Факел”,
г. Калининград

Научный руководитель: Румянцев Альберт Владимирович,
кандидат физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: Ким Владимир,
доктор технических наук, главный
научный сотрудник НИИ ПМЭ
Московского авиационного института

Семенкин Александр Вениаминович,
кандидат технических наук, начальник
отделения ЦНИИ машиностроения,
г. Королев (МО)

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский
институт электромеханики, г. Москва

Защита состоится “___” _____ 20 г. в _____ на заседании
диссертационного Совета Д212.125.08 в Московском авиационном
институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993,
г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
авиационного института (государственного технического университета).

Автореферат разослан “___” _____ 20 г.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью,
просим выслать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый Совет МАИ, Ученому секретарю
диссертационного Совета.

Ученый секретарь диссертационного Совета _____ Зуев Ю.В.
Д212. 125. 08, профессор, доктор техн. наук

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Современные тенденции – увеличение длительности полетов космического аппарата (КА), повышение их энерговооруженности, существенное усложнение полетных программ, включающих в себя все большее число орбитальных маневров, в том числе, маршевых, – требуют использования электроракетных двигателей малой тяги (ЭРД МТ), позволяющих обеспечить необходимые для этого суммарные импульсы тяги при относительно небольшом запасе рабочего тела (РТ).

После первых успешных летных испытаний, проведенных в 1972 году в составе ИСЗ “Метеор”, ЭРД МТ типа “стационарный плазменный двигатель” (СПД) разработки ОКБ “Факел”, стали регулярно использоваться в системах ориентации и управления движением космических аппаратов.

Штатная эксплуатация серийных холловских двигателей типа СПД начата в 1982 г., когда на борту геостационарного КА “Поток” разработки НПО ПМ была установлена ЭРДУ на базе СПД-70. В период с 1982 по 2006 г. на орбиту выведено 15 геостационарных КА “Космос” и “Луч” разработки НПО ПМ с 60 двигателями СПД-70. Эти двигатели также были установлены на геостационарном КА KazSat разработки ГКНПЦ им. М.В.Хруничева, выведенном на орбиту в 2006 г. В настоящее время СПД разработки ОКБ “Факел” используются в составе ИСЗ, разрабатываемых НПО ПМ, РКК “Энергия”, ГКНПЦ имени М.В.Хруничева, НПО имени С.А. Лавочкина, а также в составе ряда зарубежных ИСЗ. В целом за период с 1982 по 2005 г. на орбиту выведены 28 геостационарных КА связи разработки НПО ПМ, в составе которых использовались и используются 164 СПД.

Востребованность СПД объясняется его существенно более высоким удельным импульсом тяги в сравнении с химическими двигателями (ЖРД, ТТРД). Кроме того, он обладает относительно простой конструкцией и достаточно высокой надежностью.

При создании СПД требуется проведение большого объема экспериментальной наземной отработки, включающей длительные (до 10 тыс. часов) огневые испытания. При этом важнейшей задачей является обеспечение надежного измерения основных параметров двигателя: тяги, потребляемой мощности, расхода ксенона, определяющих его тяговую эффективность. С учетом малости величин тяги и расхода СПД, при его испытаниях используются специальные средства измерений. Среди этих средств наибольшие проблемы создают:

- система измерения тяги – вследствие того, что необходимо минимизировать сопротивление из-за “жесткости” подводных магистралей;
- система измерения малых расходов ксенона, главной проблемой которой является обеспечение независимости результатов измерений от внешних условий испытательного стенда во время испытаний.

Анализ состояния типовых систем измерения основных параметров двигателя показывает, что, если для систем измерения тяги найдены приемлемые решения, то системы измерения расхода рабочего тела остаются

одним из “слабых“ звеньев, так как типовая система измерений расхода, применяемая в ОКБ “Факел”, – ведущем предприятии России в области разработки и производства летных образцов СПД, а также в ряде других организаций России, не обеспечивает паспортной узости нормальной области значений влияющих физических величин, и, как следствие, приемлемой воспроизводимости результатов измерений. Недостатки стендовой системы подачи ксенона (ССПК) обусловлены наиболее часто используемым в ней средством измерения – тепловым расходомером типа РРГ-3,6,9,10 (или расходомером фирмы “MKS Instruments“).

Это расходомеры: не вакуумного исполнения, поэтому они: размещаются вне вакуумной камеры стенда; не имеют системы термокомпенсации; не определяют температуры газового потока и внешней среды до и во время измерений. Поэтому испытание одного и того же двигателя на разных стендах приводит к разным результатам: если по тяге отличия лежат в диапазоне $(-1,1) \div (+1,9)\%$, то по суммарному расходу диапазон значительно шире: $(-4,4) \div (-15)\%$. При измерениях малых катодных расходов различия в результатах могут охватывать диапазон $(-17) \div (+17)\%$.

При дросселировании газа в стендовой системе подачи его температура изменяется, однако определить эти изменения с помощью РРГ для внесения температурных поправок в силу указанных выше причин невозможно. Влияние температурных условий особенно заметно сказывается при проведении ресурсных испытаний, длительностью в месяцы. Неустранимое влияние температурных условий на показания расходомера снижает воспроизводимость результатов измерений параметров двигателя.

Из приведенного выше следует, что требование к точности измерений не является в данном случае определяющим, т.к. без знания уровней: утечек газа внутри камеры, влияния давления и температурных условий, высокая точность измерений не обеспечит и высокую их достоверность. Погрешность системы измерения расхода по оценкам ОКБ “Факел“ составляет $\sim 3 \div 4\%$ (на стендах NASA – 2%). Статистическая обработка результатов испытаний по большим объемам выборки показала: для блоков газораспределения максимальный диапазон различий составляет $(-10) \div (+8,3)\%$; для двигателей диапазон различий составляет: по тяге и расходу $\sim \pm 3,5\%$, по удельному импульсу тяги $\sim (-5) \div (+7,5)\%$. Однако воспроизводимость результатов испытаний на разных стендах, как показано выше, неудовлетворительна. С расходом в двигатель связаны сила разрядного тока и разрядная мощность, тяга, удельный импульс тяги, запас рабочего тела ($M_{рт}$), поэтому достоверное определение расхода РТ в двигатель при его разработке, доработке, проведении огневых, параметрических, тепло-вакуумных и приемо-сдаточных испытаний является одной из важнейших задач.

С учетом изложенного целью данной работы является разработка системы измерения расхода рабочего газа для наземной отработки ЭРД с исключенными или минимизированными погрешностями, обусловленными влиянием внешних факторов.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать метод, обеспечивающий возможность размещения расходомера

в вакуумной камере стенда и независимость результата измерения от указанных выше влияющих факторов (т.е. высокую воспроизводимость) с сохранением приемлемых точности и чувствительности;

- провести анализ существующих средств измерения расхода газа, и определить их возможности и недостатки;
- провести анализ процессов теплообмена в тепловых расходомерах, наиболее пригодных для измерения малых расходов газа, а также анализ факторов, влияющих на показатели теплового расходомера, разработать способы их оптимизации;
- разработать принципы проектирования и создать действующие модели тепловых расходомеров новых схем с требуемыми характеристиками;
- разработать методику и экспериментально определить показатели созданных моделей расходомеров новых схем;
- разработать рекомендации по применению созданных расходомеров новых схем в практике испытаний ЭРД на стендах.

При решении сформулированных задач были разработаны физические модели тепловых систем расходомеров, проведены расчеты их параметров. Это позволило теоретически обосновать целесообразность применения выбранных физических принципов и конструкторских решений при разработке расходомеров новых схем, а также оптимизировать процессы теплообмена в них.

По результатам проведенных исследований изготовлены опытные экземпляры расходомеров, не имеющие аналогов по своим характеристикам; проведены эксперименты, имитирующие условия (в том числе, работающий двигатель) работы расходомера в вакуумной камере стенда, подтвердившие работоспособность созданных расходомеров в таких условиях; разработаны рекомендации по применению расходомеров и реализации метода определения расхода в стендовой системе подачи ксенона.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен и теоретически обоснован принципиально новый метод обеспечения температурной независимости расходомера, состоящий в термостабилизации газового потока на задаваемых и контролируемых уровнях, обеспечивающий высокую воспроизводимость результатов измерения расхода рабочих тел и возможность задания верхнего предела диапазона измерений расхода с обеспечением замкнутости метода;
- впервые предложено и обосновано осуществление термостабилизации теплоносителя в тепловом расходомере на задаваемых температурных уровнях переходом к пространственно распределенному теплообменнику управляемой мощности, и устранение ориентационной зависимости показаний расходомера подачей контролируемой среды в измерительные каналы в противоположных направлениях;
- впервые показана возможность оптимизации процесса конвективной теплоотдачи в тепловых расходомерах, позволяющей создать расходомер с характеристиками, не зависящими от теплофизических свойств текучей среды, и расходомер, обладающий наибольшей чувствительностью.

Практическая значимость работы определяется следующим:

- созданы модели расходомеров рабочих газов, показатели которых не

имеют аналогов, и определены их расходные характеристики;

- разработаны методика и рекомендации по применению созданных моделей расходомеров в практике исследований и испытаний ЭРД.

Основные положения, выносимые на защиту:

- положение о возможности обеспечения температурной независимости тепловых расходомеров газа путем термостабилизации измеряемого газового потока на задаваемых и контролируемых уровнях;
- положение о возможности устранения ориентационной зависимости показаний теплового расходомера подачей контролируемой текучей среды в измерительные каналы в противоположных направлениях;
- методы оптимизации процессов конвективного теплообмена в тепловых расходомерах.
- результаты экспериментального исследования созданных моделей расходомеров новых схем.

Личный вклад автора заключался: в теоретическом обосновании предлагаемых подходов и решений, их конструкторской реализации и создании моделей расходомеров новых схем; создании лабораторного измерительного комплекса и проведение на его базе исследований созданных моделей расходомеров; анализе результатов экспериментов и формулировании выводов на их основе; разработке рекомендаций по использованию созданных расходомеров в практике испытаний ЭРД.

Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на: постоянно действующих в университете семинарах студентов, аспирантов и молодых ученых (с 2004 по 2008-й г.); международной конференции “Инновации в науке и образовании” (2007 г.); научно-технических советах и семинарах ОКБ “Факел”. Основное содержание и результаты работы изложены в 10-ти печатных работах и в двух патентах РФ.

Объем и структура работы

Работа представляет собой рукопись объемом 184 страниц печатного текста, включая 91 рисунок, 25 таблиц, а также список цитируемой литературы, насчитывающий 172 наименований. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и шести приложений.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы работы, ее цель и задачи.

В первой главе на конкретных примерах показана востребованность двигателей типа СПД разработки ОКБ “Факел”, способных решать не только задачи коррекции и стабилизации орбиты КА, но и новые полетные задачи, в том числе, маршевые. Развитие космической техники существенно повышает уровень требований к параметрам ЭРД, и, прежде всего, к величине удельного импульса тяги. По оценкам повышение удельного импульса тяги СПД до (2500÷3000 с) обеспечит снижение запаса РТ на борту КА ~ на 100 кг, что позволит увеличить долю полезной нагрузки и довести срок активного

существования таких КА до 12÷15 лет. Повышение энерговооруженности КА до 10 ÷ 50 кВт позволит в ближайшем будущем решать с помощью ЭРДУ на базе СПД маршевые задачи.

На примере “параметрического ряда” СПД показывается, как изменение основных параметров отражается на изменении удельных характеристик и критериях качества двигателя, в частности, по мощности и по суммарному импульсу тяги, непосредственно связанных с расходом рабочего тела, чем и определяется важность достоверного измерения расхода стендовой системой подачи при наземной отработке двигателя.

СПД, изготовленный ОКБ “Факел“, представляет собой штучное изделие. Обеспечение выхода продукции только высокого качества достигается предварительными испытаниями как всех комплектующих, так и после их сборки в блоки и узлы на соответствие конструкторской документации (КД). Статистическая обработка результатов испытаний блоков газораспределения (БГР) по обоим входам показала, что погрешность измерения малых катодных расходов G_{ki} может составлять $\pm 17\%$, а суммарных $G_i \sim \pm 7,2\%$. Большая погрешность измерения расхода при испытаниях комплектующих и БГР на стенде приводит к увеличению объема испытаний и количества отбракованных комплектующих из-за их несоответствия требованиям КД.

Статистическая обработка результатов испытаний двигателей показала следующее (табл.1): усредненная погрешность измерения тяги и расхода составляет $\sim \pm 3\%$, а для рассчитываемого значения удельного импульса тяги $\sim \pm 6,3\%$; как видно на рис.1 – подчинение плотностей распределения по этим переменным нормальному закону с явно выраженной левосторонней асимметрией по расходу ($S_k(G) = -1,1$) и с правосторонней ($S_k(I_{уд}) = 2,7$) – по удельному импульсу тяги; слабость связи между экспериментальными значениями тяги и расхода – коэффициент связи $r(F,G) \approx 0,1$. Разброс параметров большой: по тяге – 6,5%; по расходу – 9%; по удельному импульсу тяги – 13,2%.

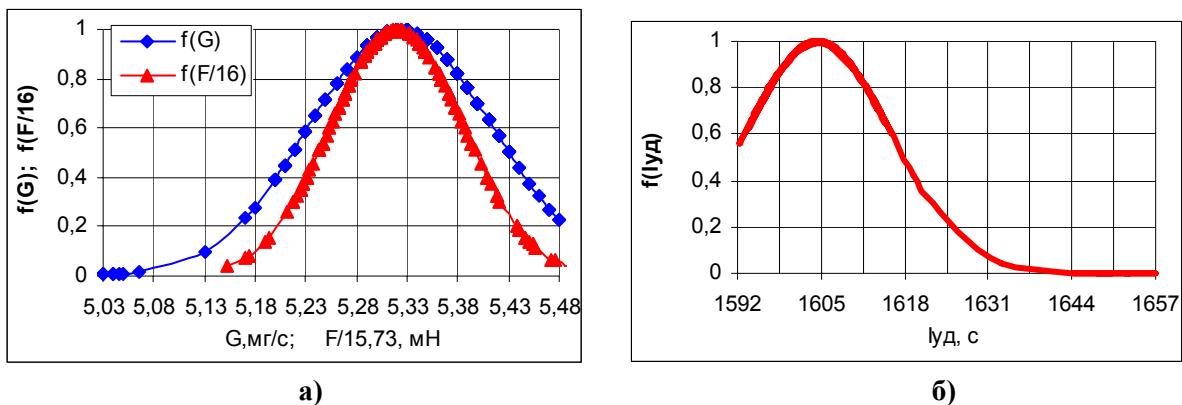


Рис. 1 Нормированные плотности распределения:
а) – тяги и расхода; б) – удельного импульса тяги

Таблица 1

Результаты статистического анализа

	Ковар. %	Ср. зн. \bar{X}	Станд. откл.	Кэф-т асимметр. S_k	Эксц. E_x	Двухпарам. анализ	Совпад. знаков	Кэф. св. r
$F_T, \text{ мН}$	1,24	83,7	1,04	0,23	-0,26	F, G	0,12	0,10
$G, \text{ мг/с}$	1,32	5,32	0,07	-1,10	1,32	F, $I_{уд}$	0,40	0,63
$I_{уд}, \text{ с}$	1,75	1605	28	2,67	2,00	G, $I_{уд}$	-0,45	-0,71

Качественная измерительная система должна обеспечивать, прежде всего, воспроизводимость результатов измерений. Испытания одного и того же двигателя в разных режимах на трех стендах показали, что отличия по расходу от результатов, полученных на стенде 1, составляют: $-4,6\%$ и -15% для стендов 2 и 3 в режиме “прожиг”; -6% и -9% в 1-м режиме; -4% и -6% во 2-м режиме. Поправки на различие давлений в камерах стендов несколько снижают приведенные показатели, но все равно они остаются большими. Это означает, что воспроизводимость результатов измерений расхода на испытательных стендах недостаточна, и что расход на испытательном стенде измеряется с завышением $-f(G) > f(F)$ во всем диапазоне $\Delta(G;F)$, как это видно на рис.1, и $S_k(G) < 0$ – левосторонняя асимметрия, и по модулю $|S_k(G)| > 1$.

В целях снижения затрат на испытания комплектующих элементов и БГР в сборе, в ОКБ проведена работа по замене ксенона на газы-имитаторы – азот и аргон (разница в цене в ~ 3000 раз), при установленном для них изменении давления при одинаковых массовых расходах по ксенону и газам-имитаторам. Поэтому рабочими телами при исследовании показателей разрабатываемых расходомеров должны служить: ксенон, азот и аргон.

Далее рассмотрены основные недостатки типовой стендовой системы измерения расхода с расходомером типа РРГ, используемой в ОКБ “Факел” и в других российских организациях, которые обусловлены следующим:

- расходомеры не допускают использования в вакуумной камере стенда, т.к. газовый тракт и электронный блок не вакуумного исполнения размещены в едином корпусе (нулевое разнесение);
- расходомеры не имеют термокомпенсационных схем, не могут определить температуры газового потока и внешней среды с целью внесения поправок;
- датчик расхода находится вне вакуумной камеры и отделен от системы газораспределения арматурой с неопределенными в ней утечками газа.

Делается вывод, что метод определения расхода, базирующийся на РРГ, как средстве измерения, приводит к завышению результатов измерения расхода, не обеспечивает приемлемой их воспроизводимости, и поэтому необходима разработка метода, лишённого отмеченных недостатков.

Подробный анализ различных принципов измерения расхода показал, что в области малых расходов наиболее эффективным является тепловой. При этом одной из основных проблем является обеспечение температурной независимости средств измерения расхода. В основе большей части известных решений, направленных на ее обеспечение, лежат мостовые схемы, в которых измерительный и компенсационный термоприемники включены в смежные плечи электрического моста. Известны также способы, состоящие в поддержании постоянства температуры измерительного термоприемника или разности температур измерительного и термокомпенсационного приемников.

Общим недостатком применяемых способов термокомпенсации является пассивный характер этих систем. Во многих промышленно освоенных тепловых расходомерах система термокомпенсации вообще отсутствует.

В расходомерах типа РРГ или “MKS Instruments” марки M10MB, на сенсорной трубке размещаются термопреобразователи с металлической проводимостью, включенные в плечи моста. В отсутствие расхода мост

сбалансирован и выходной сигнал равен нулю. При подаче расхода в диагонали моста возникает напряжение рассогласования, составляющее микровольты. Поэтому электронная схема усиления сигнала и его линеаризации располагается рядом с сенсорной трубкой, что требует совмещения газового тракта и электронного блока не вакуумного исполнения в единой корпус, – “нулевое” разнесение, что исключает использование этих расходомеров в камере стенда.

Сопоставление современных тепловых расходомеров по погрешности позволило определить ее средние значения: по основной погрешности – 2,6%, по дополнительной погрешности – 1,5%.

На основании анализа современных средств измерения расхода и требований пользователей сделан вывод о необходимости разработки расходомера, обладающего следующими показателями:

- пригодность для работы в вакуумной камере стенда ($P \sim 10^{-5}$ мм. рт. ст.);
- температурная независимость в диапазоне температур: контролируемой текучей среды – 284÷304 К, внешней среды – 268÷323 К;
- контролируемая текучая среда – ксенон, аргон, азот;
- длина разнесения преобразователя расхода и электронного блока – не лимитируется (до ~ 20-ти м);
- диапазон расхода газа – изменяемый в пределах 0÷100 мг/с;
- возможность определения температур текучей и внешней сред;
- выходной сигнал – не требующий усиления, природа сигнала – любая, допускающая дискретную или непрерывную регистрацию;
- номинальная погрешность – не более 2%;
- чувствительность – не хуже 0,5 В/(мг·с⁻¹);
- высокая помехозащищенность;
- проектный ресурс – не менее 5000 часов;
- ориентационная независимость;
- многопараметричность расходомера, обеспечивающая замкнутость метода;
- серийность используемых элементов электроники и термодатчика.

Во второй главе путем решения сопряженных задач внутреннего теплообмена с граничными условиями 1-го, 2-го, 3-го родов и смешанных, анализируются тепловые процессы как в не теплоизолированном, так и в теплоизолированном газовом тракте расходомера. Показано, что в первом случае выходной сигнал расходомера становится параметрическим по двум произвольно меняющимся и не связанным друг с другом параметрам: температуре входящего потока $T_{г.вх.}$ и температуре внешней среды T_c . Во втором случае выходной сигнал расходомера остается параметрическим по одному произвольно меняющемуся параметру – $T_{г.вх.}$. Для обеспечения температурной независимости расходомера с участием автора предложен принципиально новый метод, состоящий в термостабилизации газового потока на задаваемых и контролируемых температурных уровнях T_p .

Реализация метода потребовала:

- разделения газодинамического тракта расходомера на два канала – измерительный и термостабилизирующий каналы, объединяемых в единую газотепловую систему газораспределительной камерой (ГРК);
- размещения на входе в ГРК теплообменника с нагревательным элементом

для нагрева газового потока перед его подачей в ГРК.

Далее обосновываются выбор типа термопреобразователей (термисторы СТ1-27 и СТ1-18, обладающие на порядок бóльшим ТКС в сравнении с металлическими термоприемниками), принципов и средств обеспечения нормального функционирования системы термостабилизации (СТР_Т) в автоматическом режиме.

Принцип работы СТР_Т функциональная схема которой показана на рис. 2, базируется на существовании в системе отрицательной обратной связи между температурой термистора (ТЧЭ_Т) и его омическим сопротивлением. Термистор используется в качестве следяще-управляющего элемента блока управления, поскольку производная $dR(T)/dT$ отрицательна. Он включается в схему резистивного деления напряжения с $U_0 = \text{const}$ и снимаемое с него напряжение, пропорциональное его сопротивлению $R(T_r)$ при температуре газового потока T_r , подается в блок управления мощностью (БУМ) нагревательного элемента (НЭ) теплообменника (ТО). При отклонении уровня T_r от задаваемого T_n , сигнал рассогласования $\Delta U_{tr} \sim \Delta R_{tr}(T_n - T_r)$, поступает в БУМ, вырабатывающий подводимую к НЭ дополнительную мощность $\Delta W \sim \Delta U_{tr}(T_n, T_r)$, сводящую ΔR_{tr} к нулю. Уровень T_n задается с помощью переменных резисторов.

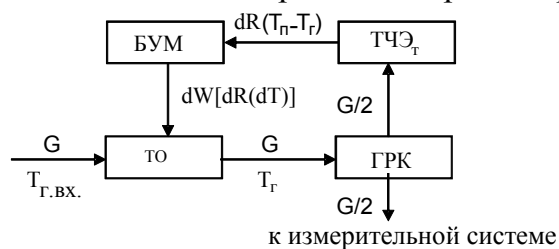


Рис. 2 Функциональная схема системы термостабилизации расходомера

Нагретый до уровня T_n газовый поток из ТО поступает в ГРК и из нее – в каналы с термисторами. Анализ тепловых процессов в газодинамическом тракте (половина длин ГРК и канала) показал, что при наличии СТР_Т температура потока будет колебаться в пределах $T = T_n \pm (\Delta T_{грк} + \Delta T_{кан.})$. Амплитуда колебаний температуры, найденная путем решения сопряженной задачи внутреннего конвективного теплообмена при обобщенных граничных условиях 1-го и 3-го родов, составляет $\approx \pm 4$ К, что недопустимо много. С целью исключения колебаний температуры газового потока осуществляется управляемый подогрев стенок каналов с теплочувствительными элементами (ТЧЭ) для компенсации разницы температур $\Delta T = [T_n - T(0,5L_{кан.})]$. Для оценки величины удельной мощности q_c , которую необходимо подвести к стенкам каналов, решается сопряженная задача внутреннего теплообмена с обобщенными граничными условиями 2-го и 3-го родов. Решение связывает температуры в сечениях элементов тракта с величиной q_c .

Величина q_c не критична при условии, что она не меньше расчетных значений. Таким образом, переход к пространственно распределенному теплообменнику управляемой мощности позволяет:

- осуществить температурную независимость показаний расходомера в широком температурном диапазоне;
- обеспечить применимость расходомера при разных температурных условиях благодаря активному характеру работы СТР_Т. Оценка ее чувствительности

показала, что отклонение температуры потока от задаваемого уровня T_n составляет $\sim \pm 0,05$ К. Постоянная времени системы $СТР_T \sim 0,3$ с.

В третьей главе рассматриваются тепловые процессы в измерительной системе с позиции их оптимизации; оцениваются ее динамические параметры и анализируется влияние помехосоздающих факторов.

Различные условия эксплуатации расходомера могут приводить к изменению ориентации его оси в пространстве, что дополнительно повлияет на его точность, т.к. в области малых чисел Рейнольдса (Re) становится заметным влияние термогравитационного компонента конвекции.

Для исключения ориентационной зависимости показаний расходомера и контроля качества работы $СТР_T$, двухканальная схема газодинамического тракта дополняется еще двумя каналами так, чтобы газовый поток поступал в каналы с измерительными термисторами в противоположных направлениях. Газодинамический тракт должен теперь иметь четыре идентичных канала. В измерительных каналах $ТЧЭ_G$, электрически соединенные последовательно, омываются противоположно направленными потоками, что обеспечивает ориентационную независимость. В любом другом из оставшихся каналов размещается $ТЧЭ_T$, включенный в качестве управляющего элемента в $СТР_T$. В последнем канале размещается $ТЧЭ_n$, который принимает температуру газового потока T_n и по его сопротивлению $R(T_n)$ контролируется качество работы системы $СТР_T$.

Разделение потоков на четыре одинаковых по температуре (T_n) и расходу осуществляется ГРК, герметично соединенной с каналами. При такой схеме все каналы являются газодинамически подобными, т.к. обеспечиваются тепловое, геометрическое, кинематическое и динамическое подобия. Для замыкания газовой сети потоки из каналов объединяются герметичным корпусом, с выходным штуцером. Входным штуцером обладает теплообменник. Показанная на рис. 3а схема газодинамического тракта была предложена (с участием автора) впервые. Функциональная схема расходомера представлена на рис. 3б. Ее структура предопределена схемой газодинамического тракта.

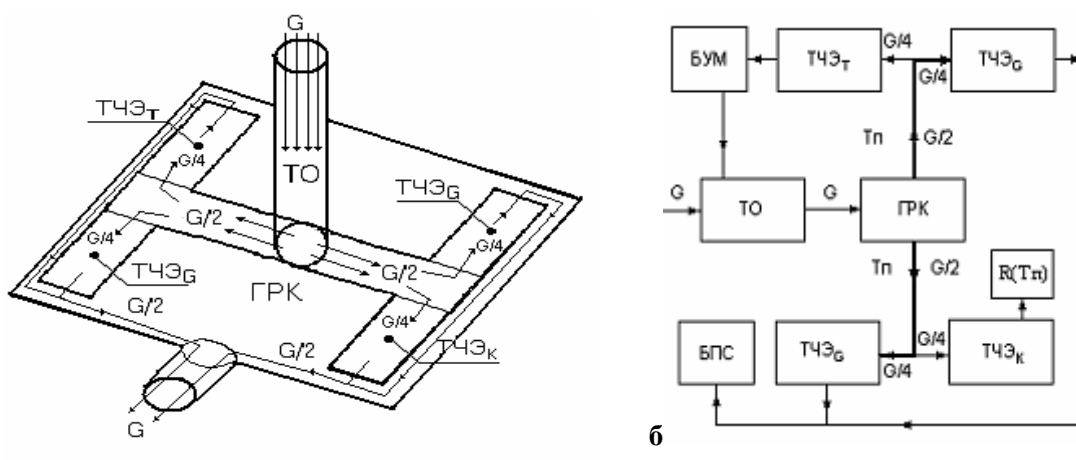


Рис. 3 Модель газодинамического тракта (а) и функциональная схема расходомера (б)

Математическая модель измерительной системы при упрощающих предположениях, обусловленных малостью линейных размеров $ТЧЭ$, и учета только конвективного механизма теплообмена, описывается уравнением

теплового баланса:

$$Cd\vartheta(G)/d\tau = W(G) - \alpha(G)S \cdot \vartheta(G) \pm \delta W, \quad (1)$$

где $\vartheta(G) = T(G) - T_{\Pi}$ – температурный напор; C – теплоемкость ТЧЭ; $W(G)$ – мощность источника энергии – $W(G) = q(G) \cdot S$, которая в общем случае может быть функцией расхода; $\alpha(G)$ – коэффициент теплоотдачи; $\pm \delta W$ – мощность неинформативных потоков (при этом $\delta W \ll W$).

Начальным условием к уравнению (1) служит максимальная величина нагрева ТЧЭ $G = T_0 = T_{\max} = 348$ К. Решение уравнения (1) для установившейся температуры ТЧЭ G в регулярной стадии процесса будет иметь вид:

$$T[q(G), T_{\Pi}] = T_{\Pi} + \vartheta(G) = T_{\Pi} + q(G)/\alpha(G), \text{ или } \vartheta(G, T_{\Pi}) = q(G)/\alpha(G). \quad (2)$$

В выражении (2) от аргумента G (расхода) зависят и удельная мощность $q(G)$ и $\alpha(G)$, причем обе эти функции никак не связаны друг с другом. Отсутствие корреляции между этими функциями не позволяет однозначно связать температурный напор с расходом. Поэтому на измерительную систему необходимо наложить ограничение путем фиксирования одной из трех входящих в (2) функций. Параметрами могут быть либо удельная мощность $q(G)$, либо напор $\vartheta(G)$.

Рассмотрим первый из этих вариантов построения тепловой системы. В этом варианте мощность внутреннего тепловыделения является фиксируемым параметром на задаваемом уровне $W(G) = W_0 = \text{const}$. Величина параметра задается при отсутствии расхода. Информативным сигналом служит величина сопротивления измерительного ТЧЭ G , которую с учетом (2) можно представить в виде:

$$R(G, q_0, T_{\Pi}) = A \cdot \exp\left\{B / [T_{\Pi} + q_0 / \alpha(G)]\right\}, \quad (3)$$

где A и B – постоянные термистора, определяемые экспериментально.

Зависимость сопротивления от расхода определяется только функцией $\alpha(G)$. Поскольку величина $T_0 = 348$ К фиксирована, то величина удельной мощности внутреннего тепловыделения будет функцией α_0 и $\vartheta_0(T_{\Pi})$:

$$q_0[\alpha_0, \vartheta_0(T_{\Pi})] = \alpha_0 \cdot \vartheta_0(T_{\Pi}) = \text{const}. \quad (4)$$

В (4) в качестве α_0 берется коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции. В качестве ТЧЭ используются термисторы с косвенным нагревом СТ1-27. Приведенные расчетные формулы позволяют оценить показатели расходомера постоянной мощности. Уровень T_{Π} существенно влияет на: доступный измерению диапазон расхода; диапазон изменения выходного сигнала ($\Delta R(0, G_{\max})$); чувствительность. Именно поэтому при измерениях уровень T_{Π} следует устанавливать в зависимости от конкретных температур входящего газа и внешней среды с целью оптимизации показателей расходомера. Омическая форма сигнала позволяет осуществить помехозащищенность преобразованием – $R(G) \rightarrow f(G)$.

Процесс конвективной теплоотдачи у расходомера с $W_0 = \text{const}$ не оптимизирован. Его оптимизация может быть осуществлена, как впервые (с участием автора) было предложено, путем фиксирования температурного напора $\vartheta_0 = T_0 - T_{\Pi}$. Для этого нужно увеличивать мощность внутреннего тепловыделения так, чтобы $\vartheta_0 = \text{const}$. В этом случае увеличение с расходом

$\alpha(G)$ не компенсируется уменьшением \mathcal{Q}_0 . Процесс теплообмена будет описываться соотношением:

$$q_\alpha(G, T_0, T_{II}) = \alpha(G) \cdot \mathcal{Q}_0(T_0, T_{II}), \text{ откуда } \mathcal{Q}_0(T_0, T_{II}) = [q_\alpha(G, T_0, T_{II}) / \alpha(G)] = \text{const.} \quad (5)$$

Согласно (5), переменной должна стать удельная мощность косвенного нагрева – $q(G)$, которая становится функцией расхода, причем такой, чтобы \mathcal{Q}_0 оставался неизменным. Судить о постоянстве напора можно по постоянству сопротивления измерительного термистора ТЧЭ_G ($R(T_0) = 4,6$ кОм). Изменение мощности внутреннего тепловыделения осуществляется изменением силы тока косвенного нагрева, поэтому выходным сигналом этого расходомера будет сила тока:

$$I[G, \mathcal{Q}_0(T_{II})] = [\alpha(G) \cdot \mathcal{Q}_0(T_{II}) \cdot S / r]^{1/2}, \quad (6)$$

здесь r – сопротивление спирали нагрева термистора ($r \approx 100$ Ом).

В этом расходомере нужна система стабилизации теплового режима измерительного ТЧЭ_G – СТР_G – на задаваемом уровне T_0 , а управляющим элементом в ней должен служить ТЧЭ_G. Как показали расчеты, диапазон изменения выходного сигнала $\Delta I \sim 10 \div 22$ мА в диапазоне расхода от нуля до 50 мг/с, но чувствительность мала. Причина в том, что $I(G) \sim 0,1 \cdot [W(G)]^{1/2}$, которая изменяется тоже незначительно – $\Delta W \sim 4 \div 16$ мВт.

Исключить главный недостаток этого расходомера – малую чувствительность, можно путем увеличения сопротивления нагрузки в цепи тока косвенного нагрева на величину R_H , которая будет играть роль коэффициента усиления выходного сигнала, если в качестве такового брать падение напряжения на этой нагрузке. Предложенная мера позволяет задать значение чувствительности по соотношению:

$$U_H(G) = R_H \cdot I(G), \text{ откуда } dU_H(G) / dG = S_U = R_H \cdot dI(G) / dG, \quad (7)$$

увеличивая ее в $K = R_H$ раз с сохранением постоянства во всем диапазоне расхода. Очевидно, что величина R_H будет зависеть от рода газа, параметра T_{II} и от задаваемого уровня S_U . Значение R_H находится по формуле:

$$R_H = (S_{\text{ЗАДАВ.}})_U / S_I. \quad (8)$$

Задавая чувствительность равной 1 В/(мг·с⁻¹), для N_2 , Ar и Xe найдем: $R_H = 5,6$; $7,5$ и $13,6$ кОм, соответственно. Значения выходного сигнала составляют десятки вольт и, что крайне важно, его величина не зависит от рода газа, равно как и диапазон его изменения – $\Delta U_H(G) \sim 50$ В. Существенно, что начальное значение выходного сигнала (при $G=0$) составляет ~ 80 В. Таким образом, получена уникальная возможность измерять расход существенно разных по теплофизическим свойствам газов (типа N_2 и Xe) с одинаковой чувствительностью. Аналоги расходомера с такими показателями качества отсутствуют. Запараллеливание спиралей косвенного нагрева измерительных термисторов (в случае 4-х канального тракта) приведет к удвоению показателей расходомера.

Другой предложенный метод оптимизации теплового режима заключается в организации самой измерительной системой режима переменной мощности внутреннего тепловыделения. Для его реализации используется термистор без косвенного нагрева (типа СТ1-18). При включении его в схему резистивного деления напряжения с $U_0 = \text{const}$, термистор будет нагреваться, что приведет к изменению его сопротивления и, следовательно, к изменению выделяющейся в

нем мощности:

$$W(\vartheta) = W(\vartheta_0) \cdot [a(\vartheta) + b(\vartheta) \cdot \vartheta], \quad \text{где } W(\vartheta_0) = U_0^2 / 4R(T_0). \quad (9)$$

Здесь $W(\vartheta_0)$ и $R(T_0)$ – мощность и сопротивление термистора при $T_0 = 348$ К.

Особенности схемы резистивного деления напряжения, элементами которой являются термистор с экспоненциальной зависимостью сопротивления от температуры и постоянный резистор сопротивлением $R = R_{tr}(T_0)$, состоят в том, что, как это показано на рис. 4 ($T_{\pi} = 293$ К):

- схема обладает точкой равновесия, в которой $U_{tr} = U_R = U_0/2$;
- напряжения U_{tr} и U_R на элементах схемы, и разностный сигнал $U = U_{tr} - U_R$ описываются нелинейными, обладающими экстремумом, функциями;
- чувствительность разностного сигнала равна сумме чувствительностей сигналов, снимаемых с элементов схемы, т.к. $dU_{tr}/dU_{\pi} > 0$, а $dU_R/dU_{\pi} < 0$;
- рабочая область напряжений лежит в пределах $U_0/2 \leq U_{tr} \leq (U_{tr})_{\max}$.

Разный характер зависимости напряжений на элементах схемы деления позволяет формировать выходной сигнал как разность этих напряжений – $U = U_{tr} - U_R$, поскольку он растет от нуля до $(U_{tr} - U_R)_{\max}$, что обеспечивает:

- растущую с ростом расхода расходную характеристику (выходного сигнала);
- большую величину выходного сигнала (не нужно усиление);
- высокую чувствительность.

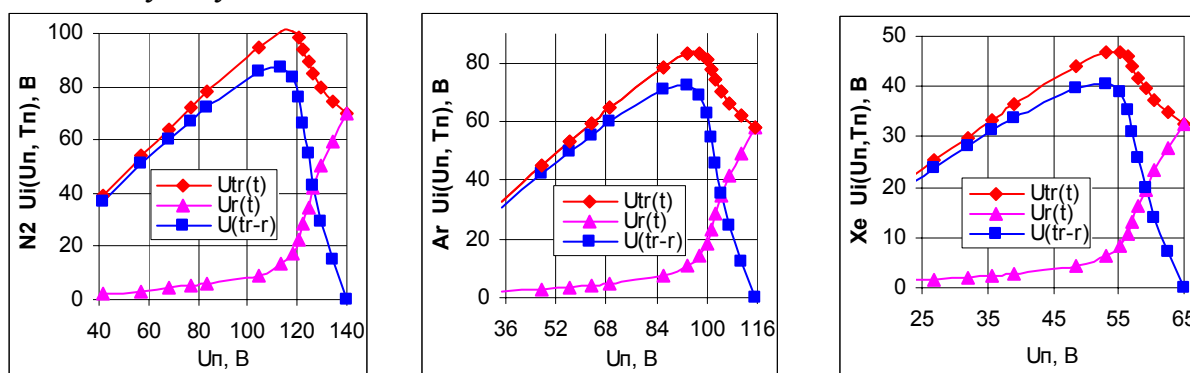


Рис. 4 Распределение напряжения по элементам схемы резистивного деления и выходной сигнал как разность падения напряжения на термисторе и на постоянном резисторе

Из рисунков видно, что амплитуда напряжений и, как следствие, сигналов U_{tr} и U_R зависит от рода газа и от уровня температуры термостабилизации T_{π} . С ростом последней острота экстремумов сглаживается, поэтому уровень T_{π} нужно устанавливать в зависимости от условий проведения измерений с целью получения максимальной величины выходного сигнала.

Математическая модель расходомера переменной мощности при ранее сделанных предположениях описывается уравнением теплового баланса:

$$Cd\vartheta/d\tau = W(\vartheta_0) \cdot [a(\vartheta) + b(\vartheta) \cdot \vartheta] - \alpha S\vartheta, \quad \text{при } \vartheta(0) = \vartheta_0. \quad (10)$$

а его решение для стационарного состояния имеет вид:

$$\vartheta(q_0, G) = aq_0 / [\alpha(G) - bq_0], \quad \text{где } q_0 = W_0 / S. \quad (11)$$

Расчет чувствительности по расходу показал, что она превосходит чувствительность известных тепловых расходомеров, и, что особенно важно, – в области малых расходов. Организация теплового режима, когда $Q_a(G)$ и $W(G)$ разнонаправлены, является наиболее эффективной.

Параметр неравномерности распределения температурного поля в термисторах $\psi = 0,9994 \div 0,9987$ на границах диапазона расхода. Оценка их тепловой инерции дает значения: $\epsilon_{\text{СТ1-27}} = 2,3 \div 2,9$ с и $\epsilon_{\text{СТ1-18}} = 0,4 \div 0,9$ с.

Анализ влияния помехосоздающих факторов и нестабильности не информативных тепловых потоков (теплоотвод по креплениям-токопроводам, нестабильность: уровня $T_{\text{п}}$ и напряжения питания электронных схем, наличие схемного тока и т.д.) дает величину 0,3 %, что значительно лучше, чем у большинства современных расходомеров. Так как расходомеры калибруются, то их расходные характеристики относятся ко всему расходу поступающего в него газа, а не к расходу через канал (каналы) с измерительным термистором. Поэтому неизбежные неточность деления ГРК газового потока на потоки расходом $G/4$ каждый, несоосность потока и измерительных термисторов, шероховатость стенок каналов и неодинаковость их диаметров не будут играть никакой роли, т.е. технологическая погрешность расходомера сведена к нулю.

В четвертой главе приводятся: описание элементов конструкций моделей расходомеров по детально и в сборе, схема лабораторного комплекса для исследования моделей расходомеров.

Корпус расходомера представляет собой цилиндрическую камеру, с которой герметично соединяется фланец. С фланцем герметично соединен корпус теплообменника с нагревательным элементом. С корпусом ТО осуществляется уплотненное фторопластовой лентой резьбовое соединение ГРК, с которой так же соединяются каналы. Теплообменник и ГРК с каналами расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Все внутренние поверхности корпуса теплоизолированы фторопластовыми пластинами и лентой (многослойной). Фланцы с закрепленными на них элементами 2-х и 4-х канального расходомеров представлены на рис. 5.

На рис. 6 приведена схема лабораторного комплекса, созданного автором для исследования расходомеров. Методика проведения экспериментов на его базе описана в пятой главе.

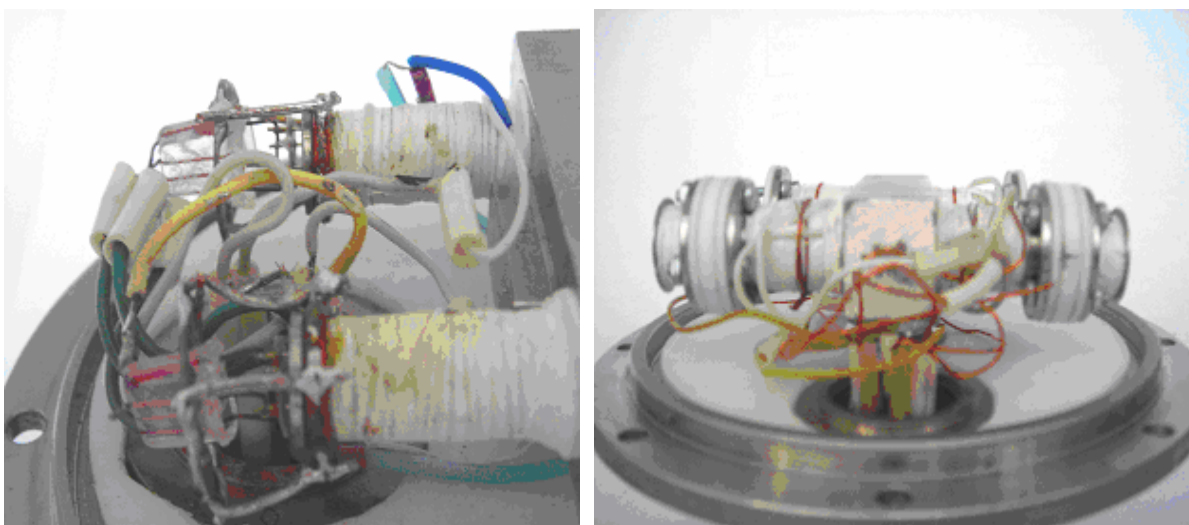


Рис. 5 Фланцы с элементами 2-х и 4-х канального расходомеров (с СТ1-27 и с СТ1-18)

В пятой главе приводятся результаты экспериментального определения

показателей разработанных моделей расходомеров; оцениваются: качество работы систем обеспечения и объективность результатов по разработанной методике; приводятся результаты экспериментов, имитирующих условия работы расходомера в вакуумной камере стенда, в том числе, при работающем двигателе; формулируется предложение по использованию моделей расходомеров в практике испытаний ЭРД на стенде и описывается методика работы с расходомером.

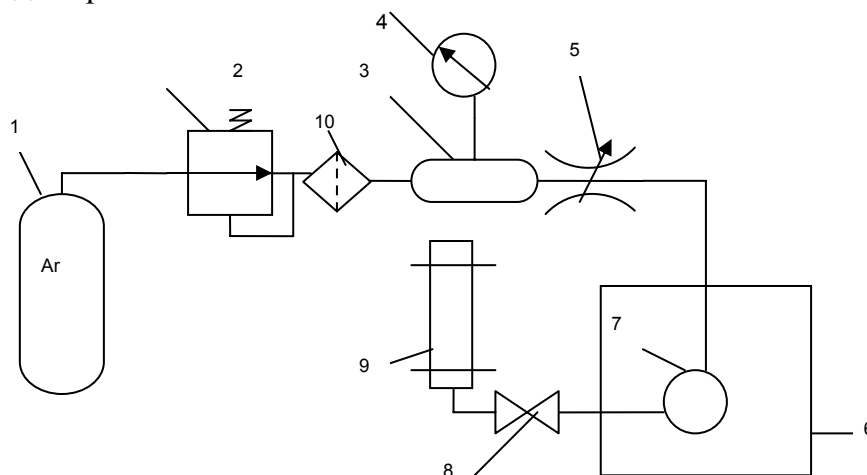


Рис. 6 Лабораторный комплекс для тарировки и исследования расходомеров
1-баллон с газом; 2-регулятор давления РДМ-1; 3-реверсивный бак; 4-манометр; 5-пневмосопротивление; 6-вакуумная камера; 7-расходомер; 8-запорный клапан; 9-калибровочное устройство; 10 - фильтр

Проверка температурной автономности расходомеров показала отсутствие зависимости показаний расходомеров от внешних условий проведения эксперимента при широком их варьировании независимо от задаваемого уровня $T_{\text{п}}$ (при условии $T_{\text{п}} > T_{\text{г.вх.}}, T_{\text{с}}$).

Оценка постоянства задаваемых параметров – силы тока $I_{\text{к.н.}}$ косвенного нагрева и напряжения питания U_0 показала, что наибольшее их отклонение от среднего по диапазону расхода составляет: 0,15% по току и 0,12% по напряжению.

При экспериментальных исследованиях в качестве контролируемой среды использовались газы: N_2 , Ar. Результаты исследования расходомера с $\underline{W_0 = \text{const}}$ в разных диапазонах расхода представлены на рис. 7. Видно, что повышение уровня $T_{\text{п}}$ приводит к существенному уменьшению как выходного сигнала, так и диапазона его изменения (отношение $R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$ у N_2 составляет 3,83 и 2,74, у Ar ~ 3,35 и 2,35 при разных $T_{\text{п}}$). Чувствительность падает как с ростом расхода, так и уровня $T_{\text{п}}$: у N_2 она составляет ~ 470 и 300 Ом/(мг·с⁻¹), у Ar ~ 320 и 230 Ом/(мг·с⁻¹). Доступный измерению диапазон расхода равен: у N_2 ~ до 100 мг/с, у Ar ~ до 120-ти мг/с.

Усредненные расходные характеристики расходомеров с постоянным напором и с задаваемой чувствительностью ($T_{\text{п}}=308$ К) представлены на рис. 8. Видна их линейность: отклонение составляет: у N_2 ~ 1,3%, у Ar ~ 0,6%. Кривые на рис. 8 б) описываются линейными аппроксимирующими функциями:

$$\begin{aligned} U(5,7)_{N_2} &= (0,89G+76,9) \text{ В}; & U(7,5)_{N_2} &= (1,42G+97,7) \text{ В}; & (12) \\ U(7,5)_{Ar} &= (0,93G+86,1) \text{ В}; & U(13,2)_{Xe} &= (0,96G+107,8) \text{ В}. \end{aligned}$$

Характеристики N_2 снимались при двух значениях сопротивлений $R_n = 5,7$ кОм и $7,5$ кОм. На рис. 8 а) видно, что они при разных $R_n \sim$ одинаковы.

Особого внимания заслуживает тот факт, что расходная характеристика $U_{Xe}(13,2к)$ лежит выше характеристик и $Ar - U(7,5кОм)$ и $N_2 - U(7,5кОм)$. Это говорит о том, что подбором R_n можно задавать чувствительность и уровень выходного сигнала расходомера независимо от теплофизических свойств газа.

При исследовании расходомера переменной мощности показана экспериментально вдвое лучшая эффективность по уровню сигнала и чувствительности схемы резистивного деления напряжения в сравнении с мостовой. На рис. 9 приведены характеристики 4-х канального расходомера. Доступный диапазон до ~ 60 -ти мг/с у N_2 и до ~ 70 -ти мг/с у Ar ; чувствительность в $V/(мг \cdot c^{-1})$ на разных его участках составляет: у $N_2 - 4$ и

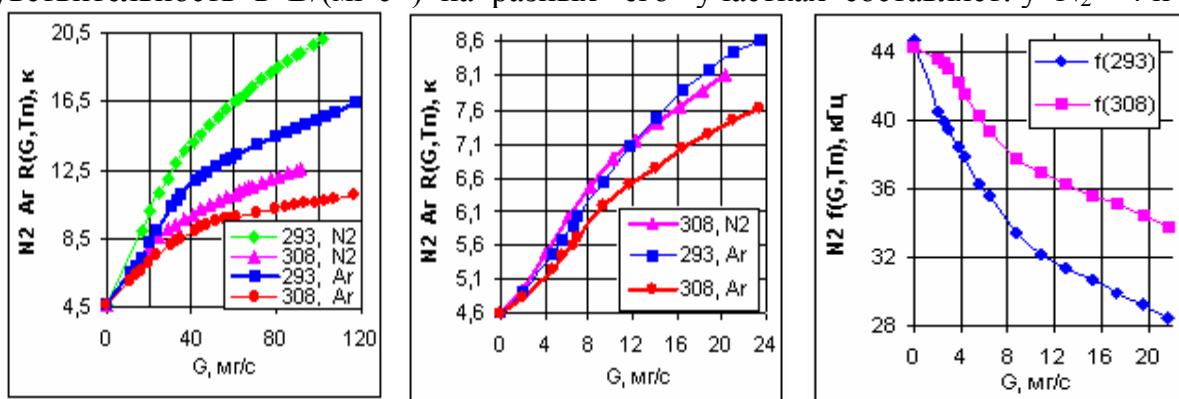


Рис. 7 Расходные характеристики расходомера с $W_0 = const$ в разных диапазонах в омической и в частотной формах выходного сигнала

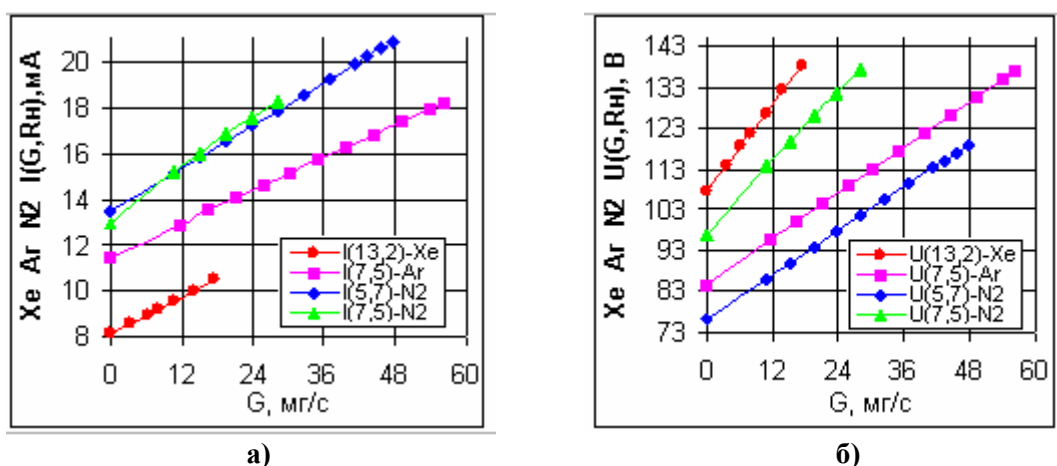


Рис. 8 Расходные характеристики расходомера: а) – с постоянным температурным напором; б) – с задаваемой чувствительностью

1,7, а у $Ar - 2,2$ и $1,2$. На среднем рисунке даны характеристики при разных диаметрах каналов ($D_1=10, D_{2,3}=5$) и их количестве ($n_{1,2}=4, n_3=2$). Видно, что диафрагмирование каналов и изменение их количества позволяет задать $G_{max} = 16$ и 12 мг/с, и повысить чувствительность с $1,8$ до $6,4$ $V/(мг \cdot c^{-1})$. Чувствительность расходомера с двумя термисторами представлена на крайнем рисунке. Видна ее неравномерность по диапазону расхода, но диапазон ее изменения весьма широк – от 2 $V/(мг \cdot c^{-1})$ при G_{max} до $12,8$ $V/(мг \cdot c^{-1})$ в диапазоне $3 \div 4$ мг/с. Усредненная по диапазону $0 \div 50$ мг/с чувствительность

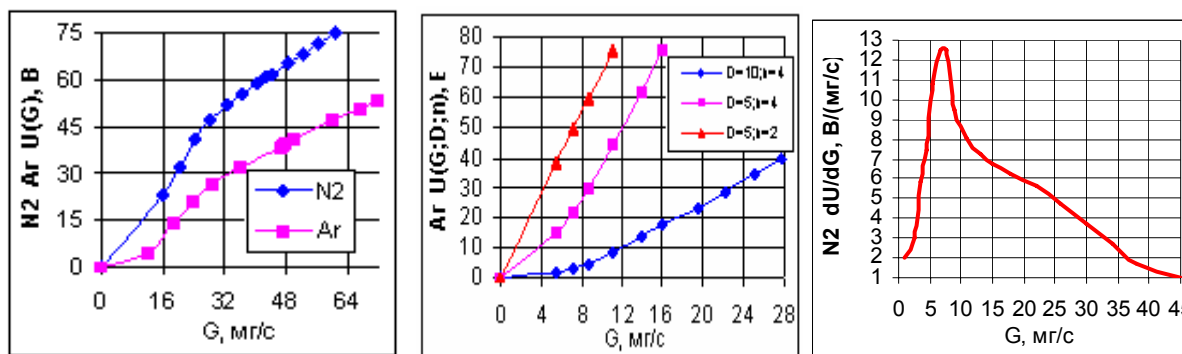


Рис. 9 Расходные характеристики расходомера переменной мощности и его чувствительность

составляет $\sim 2,3 \text{ В}/(\text{мг}\cdot\text{с}^{-1})$. Реальная чувствительность термисторов в два раза выше, чем у расходомера, т.к. она относится не ко всему расходу, а лишь к расходу через канал, в котором находится термистор.

Исследование ориентационной зависимости с расходомером переменной мощности, обладающим высокой чувствительностью, показали, что она наблюдается лишь в области расхода до ~ 5 -ти мг/с.

Для иллюстрации эффективности предложенного способа избавления от ориентационной зависимости – переход к 4-х канальной конструкции газодинамического тракта, в таблице 2 приведены значения полусуммы выходных сигналов от каждого из последовательно соединенных термисторов – $[U(+90)+U(-90)]/2$, и измеренного суммарного. Сравнение данных по столбцам таблицы показывает отсутствие систематического ухода, а отклонение полусуммы сигналов от измеренного суммарного не превосходит $\sim 1\%$. Примерно такие же в количественном отношении результаты получены (с участием автора) с помощью двухкамерного инфракрасного расходомера.

Таблица 2

Зависимость от угла β выходного сигнала расходомера переменной мощности

$G/2$, мг/с	2,15	3,01	4,09	5,16	6,02	7,10	8,17	9,03	10,1
$[U(+90)+U(-90)]/2$, В	5,46	11,63	19,12	27,42	34,64	42,72	51,91	59,48	67,04
$U_{\text{изм.}}$, В	5,52	12,02	19,16	27,30	35,18	43,01	51,94	59,21	67,04
$U_{\text{средн.}}$, В	5,49	11,83	19,14	27,36	34,19	42,87	51,93	59,35	67,04

Методики проведения эксперимента и обработки его результатов обеспечивают замкнутый характер предложенного метода определения расхода газа. Знание мощности внутреннего тепловыделения, температуры термистора и омывающего его потока позволяют найти: $\alpha(G)=q(G)/\vartheta(G)$, числа Re и Gr , следовательно, и Nu . Это позволяет: – сопоставлять расходные характеристики, имеющие разную форму выходного сигнала (например, Ом, мА, В); – оценить объективность экспериментальных данных путем сравнения чисел Нуссельта (или $\alpha(G)$), найденных по результатам эксперимента: $Nu(G)_3=Nu(0)\cdot\vartheta_0/\vartheta(G)$; $Nu(G)_3=Nu(0)\cdot[U(G)/U_0]^2$, и по известным критериальным соотношениям.

Выходной сигнал расходомера постоянной мощности имеет омическую форму (кОм), а с постоянным температурным напором – токовую (мА) и вольтовую (В), а переменной мощности – вольтовую (В). Сопоставление их

расходных характеристик путем сравнения чисел Нуссельта представлено на рис. 10 (для N_2 и Ar). Видно хорошее согласие между $Nu(I)$, $Nu(R)$, $Nu(U)$ и $Nu(\text{теор.})$, что является свидетельством объективности экспериментально полученных расходных характеристик расходомеров, работающих в разных режимах. При этом важно, что экспериментальные данные получены с термисторами, диаметры которых $d_1 = 1$ и $d_2 = 0,5$. Различие между $Nu(d_1)$ и $Nu(d_2)$ в среднем составляет $\sim 3\%$, что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

Перед проведением имитационных экспериментов, было оценено влияние температурных условий – температуры внешней среды t_c и температуры газового потока t_r – на показания расходомера РРГ-3-50-С. В первом случае расходомер обдувался газовым потоком задаваемой температуры. Во втором

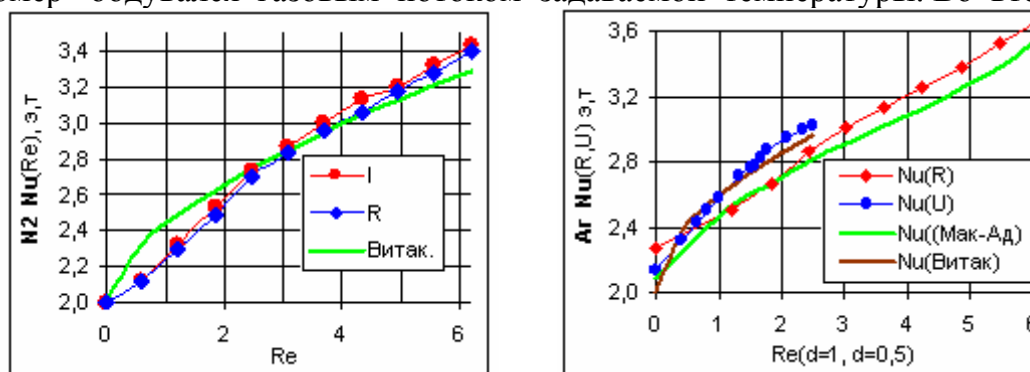


Рис. 10 Сопоставление чисел Nu при разных формах выходного сигнала (I, R, U) и их сравнение с расчетными

– температура газового потока задавалась созданным расходомером, после чего газ подавался в РРГ. Измеренные РРГ расходы сведены в таблицу 3.

В первом случае $t_r = 22^{\circ}C$, во втором $t_c = 23,2^{\circ}C$. Нормальными условиями для РРГ являются $t = 20^{\circ}C$ и давление 1 атм. Из сопоставления первых двух строк видно, что изменение температуры среды на $11^{\circ}C$ отнюдь не сводится к поправке расходной характеристики на 1% – различие в величинах расходов значительно больше. Примерно такая же картина наблюдается при изменении температуры входящего в расходомер газового

Таблица 3

$t_c^{\circ}C$	Расход, найденный по выходному сигналу $G(t_c, U)$, мг/с					
22	3,14	4,71	7,13	8,94	10,63	
33	2,81	3,74	5,67	7,43	8,76	
$t_r^{\circ}C$	Расход, найденный по выходному сигналу $G(t_r, U)$, мг/с					
24	1,51	2,43	3,64	6,33	8,12	10,51
40	1,14	1,71	2,57	4,85	6,85	9,48
46,7	1,13	1,69	2,46	4,69	6,65	9,21

потока. Как и следовало ожидать, повышение температур среды или потока приводит к занижению расхода контролируемой текучей среды, а понижение – к завышению расхода.

Первый имитационный эксперимент состоял в помещении созданного нами расходомера в вакуумную камеру, в которой обеспечивался вакуум $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. Результаты экспериментов при естественной и смешанной конвекциях представлены на рисунках 11 и 12. Видно хорошее согласие по коэффициентам

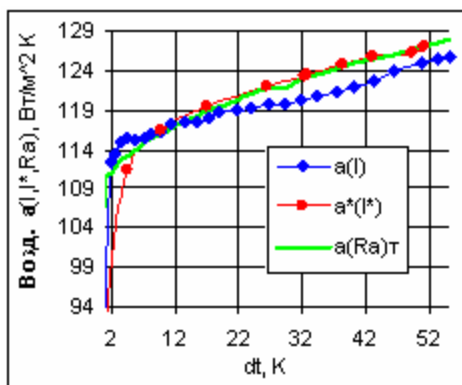


Рис. 11 Коэффициент теплоотдачи шара при естественной конвекции

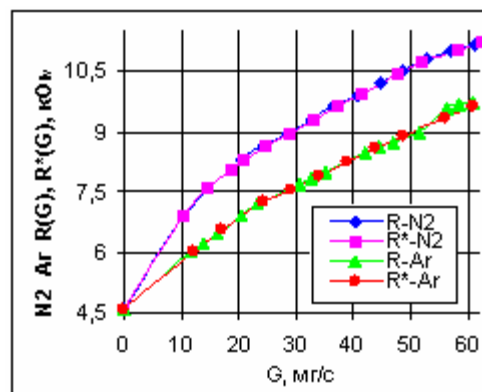


Рис. 12 Расходные характеристики N_2 и Ar в условиях вакуумной камеры (*) и вне нее

теплоотдачи и по выходным сигналам расходомера с $W_0 = \text{const}$, чем подтверждена работоспособность созданных расходомеров и в вакуумной камере стенда. Температура водоохлаждаемой стенки камеры – 21^0C , внешней среды – 26^0C , теплоносителя – 35^0C .

В следующем эксперименте – оценке влияния помехи при работающем двигателе, расходомер помещался в вакуумную камеру напылительной установки, в схеме которой имелись два ускорителя плазмы – импульсного и непрерывного действия. В качестве импульсного ускорителя был выбран импульсный генератор углеродной плазмы с графитовым катодом. Источником плазмы непрерывного действия служил источник ионов азотной плазмы мощностью 1,5 кВт. Расходомер помещался в тени ионных пучков генераторов плазмы. Контролируемая среда – аргон высокой чистоты, расход которого был 8 мг/с. Частота следования импульсов – в диапазоне $1 \div 35$ Гц. Проведенные эксперименты показали следующее: максимальная амплитуда помехи составила ~ 5 мВ на частоте следования 1 Гц, при этом форма сигнала близка к трапецеидальной. По мере увеличения частоты сигнал помехи уменьшался. При частоте выше 22-х Гц наблюдалось практически полное вырождение гармонического сигнала в непрерывный. При работе с непрерывным азотным источником помехи не обнаружено. Если учесть, что величины выходных сигналов расходомеров составляют десятки вольт, помеха в 5 мВ не может повлиять на их показания.

Расходные характеристики ксенона получены на калибровочном стенде ОКБ “Факел”. Исследуемый расходомер располагался между РРГ-3 и УИРГ (бюреткой). Температура среды $T_c = 294,3$ К, а температура Хе, измеренная по сопротивлению измерительного термистора, составляла $\sim 296,6$ К. Результаты экспериментов представлены на рис. 13 а), б). Расходная характеристика расходомера с задаваемой S_U (рис.11б)) описывается линейным полиномом:

$$U(G) = [0,96 \cdot G + 107,8] \text{ В}; \quad R^2 = 0,9971.$$

Особо отметим, что характеристики ксенона получены при входном давлении $2,5 \text{ кг/см}^2$. От рассчитанных при нормальном давлении они отличаются \sim в 1,5 раза в сторону увеличения. Объясняется столь сильная зависимость от давления в случае Хе тем, что его газовая постоянная $R=64,6$ Дж/кг·К, т.е. \sim в 4,6 раза меньше, чем у N_2 . Коэффициенты теплоотдачи, найденные по выходным сигналам разной формы (кОм и В), практически

совпадают – см. рис. 13 в).

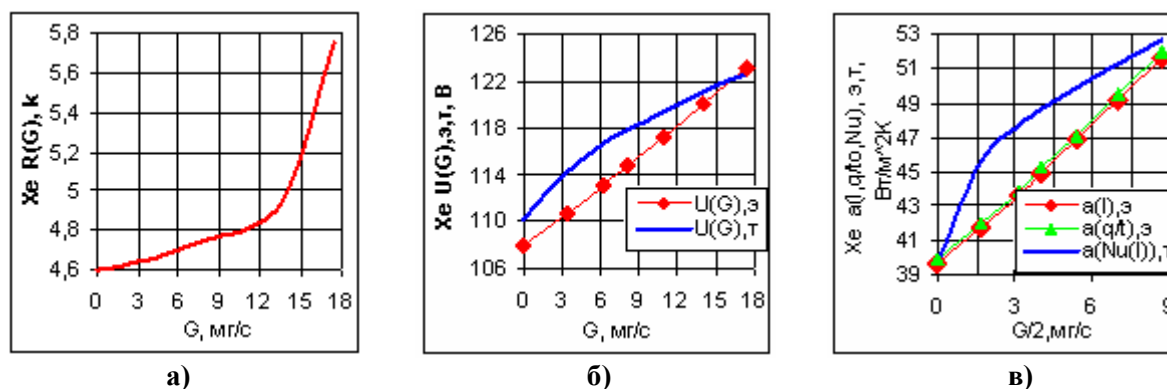


Рис. 13 Расходные характеристики расходомеров: а) – постоянной мощности; б) – с задаваемой чувствительностью; в) – коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по данным эксперимента, и его теоретическое значение, найденное с учетом давления ($P_{\text{вх.}}=2,5 \text{ кг/см}^2$)

В стендовой системе подачи давление газа на выходе ресивера поддерживается на заданном уровне в пределах $\pm 5\%$, что не может не сказаться на показаниях расходомера в случае ксенона. Оценка влияния непостоянства давления на показания расходомеров переменной мощности и с задаваемой чувствительностью показала: в первом случае систематическая погрешность составляет 0,06% и 0,03% (2 и 4 канала) и ее можно не учитывать; во втором она равна $\sim 0,38\%$ и 0,32% (2 и 4 канала), и ее учитывать нужно, хотя она и много меньше погрешности, вносимой калибратором.

Предложение по использованию на стенде разработанных моделей расходомеров состоит в следующем. Расходомеры переменной мощности или с задаваемой чувствительностью размещаются вне камеры и в камере стенда перед блоком газораспределения. Производится продувка ксеноном, после чего подача газа прекращается запираем клапанов на выходе БГР. Таким образом газодинамический тракт заполняется рабочим газом. С помощью регулировок системы термостабилизации настраиваются на выбранный уровень $T_{\text{п}}$, а температура измерительных термисторов доводится до $T_0 = 348 \text{ К}$. Сопоставление показаний расходомеров при подаче расхода позволяет оценить качество – с точки зрения утечек – арматурной части стендовой системы подачи ксенона. За расход в двигатель принимаются показания расходомера, находящегося в вакуумной камере стенда.

В Заключение сформулированы основные выводы и результаты работы:

1. Разработан и экспериментально обоснован новый метод измерения расхода инертных газов, базирующийся на тепловом принципе измерения и на расходомерах новых схем, как средстве измерения, и обеспечивающий:

- возможность проведения измерений в вакуумной камере стенда;
- независимость показаний расходомера от температур входящего газового потока и внешней среды с помощью пространственно распределенного теплообменника автоматически управляемой мощности;
- ориентационную независимость путем использования многоканального расходомера с направлением потока в измерительные каналы в

противоположных направлениях;

- возможность определения температур газового потока и внешней среды;
- многопараметричность расходомеров, обуславливающая замкнутость метода измерения.

2. Созданы и экспериментально исследованы не имеющие аналогов модели расходомеров для систем измерения расхода, используемых при наземной отработке современных ЭРД, с точностью измерения расхода инертных газов не хуже 2 %. При этом показано, что модели обеспечивают:

- реализуемость разработанных эффективных методов оптимизации тепловых процессов в системе, заключающихся в организации работы тепловой системы в режимах с постоянным температурным напором и переменной мощности внутреннего тепловыделения;

- высокую чувствительность расходомера с постоянным температурным напором, постоянную по диапазону расхода на задаваемом уровне $2 \div 2,8 \text{ В}/(\text{мг} \cdot \text{с}^{-1})$ и не зависящую от рода контролируемой текучей среды, а средняя чувствительность расходомера переменной мощности в исследованном диапазоне расхода составляет $\sim 2,3 \div 6,4 \text{ В}/(\text{мг} \cdot \text{с}^{-1})$;

- большую величину (без схем усиления) выходного сигнала – у расходомера с $\vartheta_0 = \text{const} \sim 75 \div 135 \text{ В}$, у расходомера переменной мощности $\sim 120 \div 180 \text{ В}$ и $120 \div 60 \text{ В}$, что обуславливает высокую точность измерения расхода, помехозащищенность и надежность расходомеров;

- высокую сходимость результатов измерений – не хуже 0,2%;
- значительную величину доступного измерению диапазона расхода – до 100 мг/с, верхняя граница диапазона может понижаться диафрагмированием проходного сечения каналов, изменением их количества, уменьшением температурного напора. При этом номинальная погрешность созданных моделей расходомеров определяется погрешностью калибратора.

3. Разработаны рекомендации по применению созданных расходомеров в практике испытаний ЭРД и предложена методика измерения расхода в двигатель с помощью этих расходомеров, встроенных в стендовую систему подачи рабочего тела.

В **Приложениях** приведены: расходные характеристики азота, аргона и ксенона; результаты расчета теплоотвода по креплениям-токоподводам; методика расчета параметров расходомеров; оценка погрешности; принципиальные схемы электронных блоков моделей расходомеров; оценка постоянной времени расходомера в целом (с учетом всей его массы).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Румянцев А.В., Гуськов К.В. Тепловой высокотемпературный микрорасходомер газа: сб. тез. и докл. ежегодной конф. молодых ученых РГУ. Вып. 2: Физ.-мат.науки. Калининград: Изд-во РГУ, 2005. С. 14.

2. Румянцев А.В., Гуськов К.В. Высокотемпературный микрорасходомер газа // Вестник РГУ. 2006. № 4. С. 70-76.

3*. Румянцев А.В., Шевченко П.Р., Гуськов К.В. Инфракрасный расходомер газа // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 3. С.150-154.

4*. Румянцев А.В., Гуськов К.В. Тепловой микрорасходомер газа переменной мощности // Измерительная техника. 2007. № 8. С. 37-41.

5. Гуськов К.В. Универсальные тепловые расходомеры газа в диапазоне расхода 0÷100 мг/с: материалы международной конференции “Инновации в науке и образовании”. Калининград: Изд-во КГТУ, 2007. С.16-17.

6. Гуськов К.В., Румянцев А.В. Метод автономизации тепловых термисторных микрорасходомеров газа // Вестник РГУ. Вып. 3: Сер. физ-мат. науки. Калининград: Изд-во РГУ, 2007. С. 78-86.

7*. Румянцев А.В., Гуськов К.В. Микрорасходомер газа с задаваемым значением чувствительности прибора // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 1. С. 149-154.

8. Гуськов К.В., Румянцев А.В. Процессы в газовом тракте теплового расходомера // Вестник РГУ. Вып. 4 : Сер. физ-мат. науки. Калининград: Изд-во РГУ, 2008. С. 71–77.

9. Румянцев А.В., Гуськов К.В. Тепловые микрорасходомеры газа. Материалы 1-й международной Казахстанско-Российско-Японской научной конференции и VI Российско-Японского семинара. М: Изд-во МГИУ, 2008. С. 500 – 506.

10*. Гуськов К.В., Хартов С.А. Система измерения расхода газообразного рабочего тела для испытаний электроракетных двигателей // Вестник МАИ. 2009. Т. 16, № 3. С.41-48. М.: Изд-во МАИ, 2009.

11* Румянцев А.В., Гуськов К.В. Тепловой переменной мощности микрорасходомер газа. Патент RU, № 2321830. 2008. БИ №10 от 10.04.2008.

12*. Румянцев А.В., Гуськов К.В. Микрорасходомер газа с задаваемым значением чувствительности. Патент RU, № 2362124. 2009. БИ № 20 от 20.07.09

* отмечены российские журналы из списка ВАК и патенты РФ.

Гуськов Константин Викторович

**Исследование и разработка системы измерения расхода
газообразного рабочего тела для испытательного стенда
электроракетного двигателя**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 11.2009 г.

Бумага для множительных аппаратов. Формат. 60x90. ¹/₁₆. Ризограф.
Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л.1,2. Тираж 100. Заказ 180.

Издательство Российского государственного университета им. И. Канта
236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14