

# ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 681.121, 621.455.4, 629.7.036.73

© К.В. ГУСЬКОВ, С.А. ХАРТОВ, 2009

## СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗООБРАЗНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Константин Викторович ГУСЬКОВ родился в 1983 г. в городе Калининграде (обл.). Инженер-метролог ФГУП ОКБ «Факел». Основные научные интересы — в области испытаний электроракетных двигателей. Автор 10 научных работ. E-mail: k208@mai.ru

Konstantin V. GUSKOV, was born in 1983, in the Moscow region. He is a Metrologist Engineer at the Experimental Design Bureau «Fakel». His research interests are in the field of electric propulsion thruster tests. He has published 10 technical papers. E-mail: k208@mai.ru

Сергей Анатольевич ХАРТОВ родился в 1958 г. в городе Москве. Ведущий научный сотрудник МАИ. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Основные научные интересы — в области исследования рабочих процессов в электроракетных двигателях и источниках ионов, проблем испытаний источников ионов и плазмы. Автор более 100 научных работ. E-mail: k208@mai.ru

Sergey A. KHARTOV, Ph.D., was born in 1958, in Moscow. He is a Principal Research Associate at the MAI. His research interests are in operation investigation for electric propulsion thrusters and ion sources as well as in tests of ion and plasma sources. He has published more than 100 technical papers. E-mail: k208@mai.ru

*В статье обосновывается необходимость замены в типовой стендовой системе подачи рабочего газа измерителей расхода (типа РРГ и им подобных) на разработанные тепловые расходомеры, не имеющие аналогов, с целью обеспечения однозначного и точного измерения основных параметров электроракетного двигателя, определяющих его тяговую эффективность и удельный импульс. Приводится описание созданных моделей расходомеров, их характеристик и рекомендации по использованию на испытательном стенде при наземной отработке электроракетных двигателей.*

*A necessity is substantiated to replace RRG-type and similar flow meters in a typical test bench working gas supply system. The replacement is carried out for a new thermal flow meter having no analogs to support unambiguous and exact measurements for main parameters of a thruster providing its thrust efficiency and specific impulse. Descriptions of created flow meter models are presented as well as their parameters and usage recommendations with the test bench to support ground testing of electro rocket thrusters.*

**Ключевые слова:** электроракетный двигатель, стендовая система подачи рабочего тела, измеритель расхода газа.

**Key words:** electric propulsion thruster, test bench working substance supply system, gas flow meter.

### Обозначения

СПД — стационарный плазменный двигатель;  
 $\vartheta(G) = T(G) - T_{\text{п}}$  — температурный напор, К;  
 $G$  — массовый расход газа, мг/с;

$\alpha(G)$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $W$  — мощность, Вт;  
 $q$  — удельная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $S_U$  — чувствительность по вольтовому сигналу, В/(мг·с<sup>-1</sup>);

$S_I$  — чувствительность по токовому сигналу, мА/(мг·с<sup>-1</sup>).

С начала 1980-х гг. электроракетные двигатели (ЭРД) стали широко использоваться в системах ориентации и управления движением космических аппаратов, а с середины 1990-х гг. их применение стало массовым. Востребованность ЭРД в космической технике объясняется их существенно более высоким удельным импульсом тяги по сравнению с химическими двигателями — ЖРД и РДТТ, что очень важно для выполнения задач, требующих обеспечения большого суммарно импульса. Среди многих типов ЭРД наибольшее распространение в нашей стране получил стационарный плазменный двигатель (СПД), обладающий относительно несложной конструкцией и высокой надежностью. Достаточно простыми являются также системы хранения и подачи рабочего тела в двигатель, системы его электропитания и регулирования.

Совершенствование космической техники и потребность в удешевлении оказываемых ею коммерческих услуг приводит к увеличению доли аппаратов со сроком активного существования более 5 лет. С ростом числа таких объектов масштабы применения СПД в космосе увеличиваются. Повышаются также требования к характеристикам двигателя, их стабильности в процессе эксплуатации, расширяется номенклатура типоразмеров СПД [1, 2, 3].

При создании новых моделей СПД требуется проведение большого объема экспериментальной наземной отработки, включающей длительные огневые испытания. Проведение значительного объема натурных тестов также необходимо и при производстве «серийных» образцов двигателей. Испытания электроракетных двигателей — трудоемкий процесс, требующий создания вакуумных камер большого объема с высокопроизводительными системами поддержания динамического вакуума, специальных средств измерений [3].

Решение задачи разработки новых моделей СПД с улучшенными характеристиками выдвигает новые требования к условиям их измерения при наземной отработке двигателя.

Среди специальных средств измерений, используемых при испытаниях СПД, наибольшие проблемы вызывают:

- система измерения тяги — в силу того, что развиваемое двигателем усилие меньше сопротивления из-за «жесткости» подводящих магистралей;
- устройство измерения малых расходов газообразного рабочего тела, проблемой которого явля-

ется обеспечение независимости результатов измерений от внешних условий испытательного стенда.

Анализ состояния разработки современных систем регистрации основных параметров двигателя показывает, что, если для измерения тяги найдены приемлемые решения [3], то системы измерения расхода рабочего тела остаются одним из «слабых» звеньев. Типовая система измерения расхода, применяемая в ОКБ «Факел» — ведущем предприятии России в области разработки и производства летных образцов СПД, а также в ряде других организаций, не обеспечивает однозначности результатов измерения расхода рабочего газа. Прежде всего, она не защищена от влияния внешних условий испытаний из-за отсутствия системы термокомпенсации. Кроме того, регулятор и измеритель расхода (как правило, используются расходомеры марки РРГ) находятся вне вакуумной камеры стенда. Газовый тракт и электронный блок данных устройств не вакуумного исполнения и совмещены из-за малости выходного сигнала в едином корпусе («нулевое разнесение»). Удаленное расположение расходомера от испытуемого двигателя обуславливает внесение в газовые тракты дополнительной арматуры с заметным «паразитным» объемом, наличие которого требует вводить поправку в результаты измерения расхода. Данная поправка определяется опытным путем и снижает достоверность получаемых данных. Промышленные модели расходомеров (типа РРГ) не учитывают температуру входящего газового потока и внешней среды, что не позволяет вносить поправки на отличие этих параметров во время измерений от паспортных данных (293 К), при которых производится заводская калибровка устройств. В результате всего этого погрешность используемой системы измерения расхода, по оценкам ОКБ «Факел», составляет 3—4% (на стендах зарубежных организаций, например NASA, — 2%) [4]. Система измерения расхода не обладает ни одной степенью свободы (варьируемым параметром), что и обуславливает незамкнутость метода измерения.

Из-за указанных недостатков при измерении расхода рабочего тела в процессе испытаний СПД приходится подтверждать характеристики двигателя статистическими методами. Это приводит к увеличению доли отбракованных двигателей при испытаниях «серийных» образцов, как не соответствующих требованиям технического задания, хотя по крайней мере часть из них при тестировании с однозначно установленным и более точно измеренным расходом могла быть признана годной. И, наконец, из-за большой погрешности измерений заметно увеличивается расход достаточно дорого-

го рабочего тела — газа ксенона при наземной отработке двигателя.

С целью исключения указанных недостатков для современных и перспективных систем измерения расхода нужен прибор, обладающий следующими показателями:

- пригодность для работы внутри вакуумной камеры;
- контролируемая среда — Хе, Кг и другие газы;
- диапазон измерения расхода газа 0—50 мг/с;
- определение температур текучей и внешней сред;
- температурная независимость измерений в диапазоне 268—323 К;
- выходной сигнал, не требующий усиления (форма сигнала любая);
- номинальная погрешность не более 2%;
- чувствительность не хуже 0,5 В/(мг·с<sup>-1</sup>);
- высокая помехозащищенность;
- проектный ресурс не менее 5000 ч;
- длина разнесения преобразователя расхода и электронного блока не лимитируется;
- ориентационная независимость;
- число степеней свободы не менее двух для обеспечения замкнутости метода измерения;
- малое гидравлическое сопротивление;
- серийные используемые элементы электроники и термопреобразователей.

Подробный анализ различных принципов измерения показал, что в области малых расходов наиболее эффективным является тепловой метод. При этом одной из основных проблем его эффективного осуществления является обеспечение температурной автономности системы измерения расхода.

В основе большей части известных решений, направленных на обеспечение температурной автономности, лежит использование «мостовых схем», в которых измерительный и компенсационный термоприемники включены в смежные плечи электрического «измерительного моста». Известны также способы, состоящие в поддержании постоянства температуры измерительного термоприемника или разности температур измерительного и термокомпенсационного термоприемников. Общим недостатком применяемых способов термокомпенсации является пассивный характер этих систем. Кроме того, для внесения поправок необходимо знание температуры текучей среды, которая существующими приборами, как правило, не определяется. Во многих промышленно-освоенных тепловых расходомерах системы термокомпенсации нет вообще. В расходомерах типа РРГ на сенсорной трубке раз-

мещаются термопреобразователи с металлической проводимостью, включенные в плечи «измерительного моста». В отсутствие расхода мост сбалансирован и выходной сигнал равен нулю. При подаче газа в устройство на термопреобразователях в плечах моста возникает напряжение рассогласования, составляющее микровольты. В силу этого электронная схема усиления и линейризации сигнала располагается непосредственно рядом с сенсорной трубкой, что и обуславливает совмещение газового тракта и электронного блока невакуумного исполнения в едином корпусе — «нулевое разнесение». Все это в совокупности не позволяет использовать такой расходомер внутри вакуумной камеры испытательного стенда.

Для удовлетворения сформулированных требований были созданы и исследованы четыре модели расходомеров анемометрического типа (рис. 1), отличающиеся типом термопреобразователя и режимом работы. В данном типе измерителей электрическое сопротивление датчика изменяется в зависимости от изменения расхода  $G$  и есть функция температуры стенок  $T_c$  канала, температуры газа на входе  $T_{г,вх}$  и геометрических размеров канала  $D$ :  $R(G) = f(T_c, T_{г,вх}, D, G)$ . В качестве термопреобразователя нами были использованы термисторы с косвенным нагревом (СТ1-27) или без нагрева (СТ1-18). Функциональная схема, общая для всех моделей, и геометрическая модель 4-канального расходомера представлены на рис. 2.

Согласно этой схеме расходомер функционирует следующим образом. Газовый поток с расходом  $G$  и температурой  $T_{г,вх}$  через входной штуцер поступает в теплообменник (ТО), где нагревается и затем поступает в газораспределительную камеру (ГРК), служащую для разделения потока на несколько направлений в одинаковые по размерам и форме каналы. В каналах геометрически подобно размещены термисторы — теплочувствительные элементы (ТЧЭ). Противоположно направленные потоки подаются в каналы, в которых установлены измерительные термисторы (ТЧЭ<sub>с</sub>), электрически соединенные последовательно и подключенные

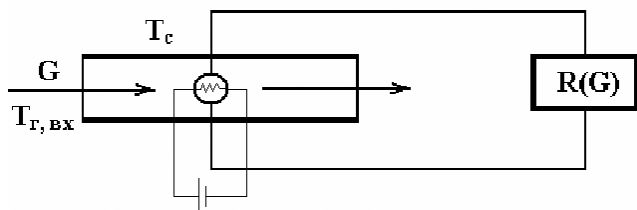
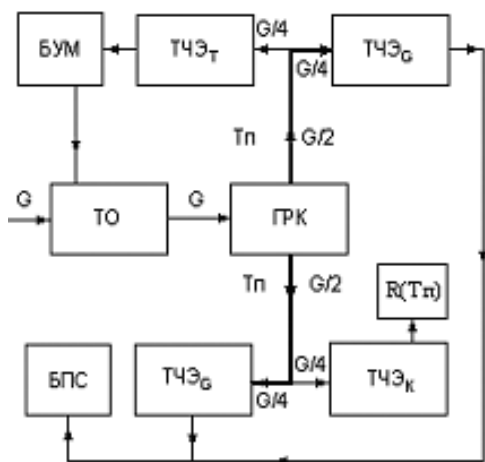
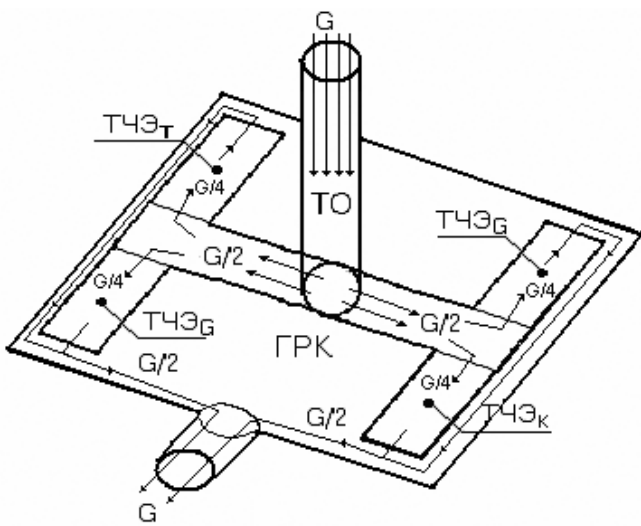


Рис. 1. Схема термоанемометрического измерителя расхода



а)



б)

Рис. 2. Схема теплового расходомера:

а — функциональная схема; б — модель газового тракта

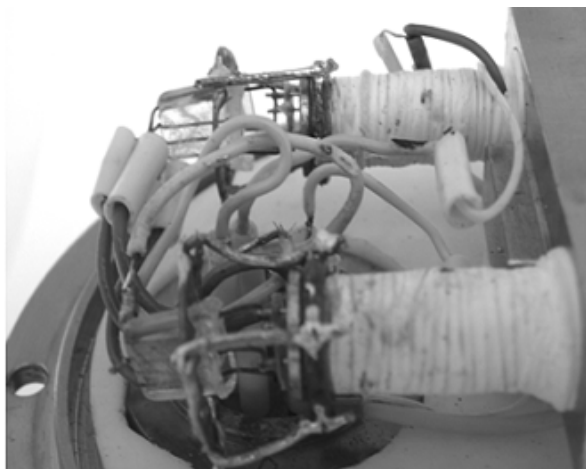
к блоку преобразования выходного сигнала (БПС). Таким способом осуществляется «ориентационная независимость» показаний расходомера. В одном из оставшихся каналов находится термистор (ТЧЭ<sub>Т</sub>), включенный в качестве следяще-управляющего элемента в электронную схему блока управления мощностью нагревателей (БУМ). Нагреватели размещены в ТО и на стенках каналов для принудительного нагрева газового потока до температуры  $T_n$ , превышающей температуры газового потока  $T_{г.вх}$  на входе в расходомер и внешней среды  $T_c$ . Это обеспечивает «температурную независимость» показаний расходомера и, следовательно, их однозначность. Одновременно число степеней свободы системы определяется количеством задаваемых уровней  $T_n$ , что делает метод измерения замкнутым. В последнем из четырех каналов находится термистор (ТЧЭ<sub>Т</sub>), по сопротивлению которого контро-

лируется температура газового потока в месте расположения измерительного термистора ТЧЭ<sub>Г</sub>.

Принцип работы системы термостабилизации газового потока базируется на существовании в системе отрицательной обратной связи между температурой термистора и его омическим сопротивлением ( $dR_r/dT < 0$ ). Термистор ТЧЭ<sub>Т</sub> включается в схему резистивного деления напряжения с  $U_0 = \text{const}$ , а другим элементом схемы служит переменный резистор. Его сопротивление устанавливается равным сопротивлению термистора при заданном уровне  $T_n$ , т.е.  $R = R_r(T_n)$ . При отклонении температуры потока от заданной на  $\pm \delta T$  сопротивление термистора изменяется на величину  $\mp \delta R_r(\pm \delta T)$ . Это приводит к появлению сигнала рассогласования  $\mp \delta U_r \sim \mp \delta R_r(\pm \delta T)$ , подаваемого в БУМ, который вырабатывает мощность  $\mp \delta W \sim \mp \delta U_r$ , сводящую  $\delta T$  к нулю. Уровни  $T_n$  взяты равными 293, 308 и 323 К, отклонение от них, согласно данным экспериментов, составляет  $\pm 0,05$  К независимо от расхода газа. Постоянство уровня  $T_n$  контролируется по сопротивлению термистора ТЧЭ<sub>Т</sub>.

Конструктивно экспериментальные модели выполнены следующим образом (рис. 3). Корпус расходомера состоит из цилиндрической камеры с выходным штуцером и фланца. Во фланец вварен корпус теплообменника, с ним герметично соединена газораспределительная камера. К камере присоединяются два (или четыре) канала, в каждом из которых жестко закреплены термисторы. Теплообменник и ГРК с каналами расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Фланец с размещенными на нем элементами через резиновое уплотнительное кольцо герметично соединяется с цилиндрической камерой. В качестве тепловой изоляции каналов и стенок камеры используется фторопласт.

Для получения расходных характеристик разработанных устройств была создана лабораторная система, имитирующая систему измерения расхода газа на испытательном стенде ОКБ «Факел». Расход газа задавался переменным пневматическим сопротивлением и контролировался ротаметром, проградуированным предварительно с использованием устройства для измерения объемного расхода газа, имеющего погрешность  $\sim 1,7\%$ . Подача в расходомер газового потока с известным расходом  $G$  и регистрация выходного сигнала как функции  $G$  позволяет экспериментально построить семейство расходных характеристик устройства по задаваемо-



а)



б)

Рис. 3. Фланцы с элементами 2- и 4-канального расходомеров:

а — устройство с термисторами СТ1-27;

б — устройство с термисторами СТ1-18

му параметру  $T_{\text{п}}$ . Рабочими газами в экспериментах были азот, аргон и ксенон.

В первой модели расходомера (постоянной мощности) процесс конвективной теплоотдачи был организован таким образом, чтобы удельная мощность косвенного нагрева  $q_0 = q_{\alpha}(G) = \alpha(G) \cdot \vartheta(G)$  оставалась постоянной независимо от величины расхода. Для этого необходимо было зафиксировать ток косвенного нагрева термистора  $I_0 = \text{const}$  в отсутствие расхода при заданном уровне  $T_{\text{п}}$ . Выходным сигналом расходомера постоянной мощности служит сопротивление измерительного термистора  $R_{\text{т}}(G, T_{\text{п}})$ . Расходные характеристики  $G(R_{\text{т}}, T_{\text{п}})$ , полученные экспериментально для азота и аргона, описываются многочленами следующего вида:

$$\begin{aligned} N_2: G(R_{\text{т}}, T_{\text{п}} = 308) &= 0,3744R^3 - 6,3039R^2 + \\ &+ 39,065R - 82,892; R^2 = 0,9994; \end{aligned}$$

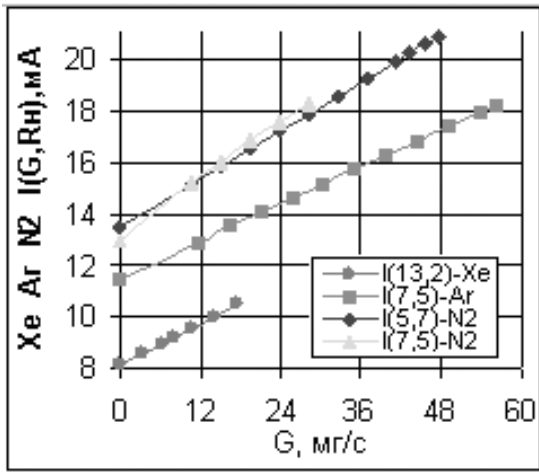
$$\begin{aligned} \text{Ar: } G(R_{\text{т}}, T_{\text{п}} = 293) &= 0,1940R^3 - 3,2728R^2 + \\ &+ 22,807R - 54,697; R^2 = 0,9992; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ar: } G(R_{\text{т}}, T_{\text{п}} = 308) &= 0,3418R^3 - 5,0174R^2 + \\ &+ 30,059R - 65,083; R^2 = 0,9999. \end{aligned}$$

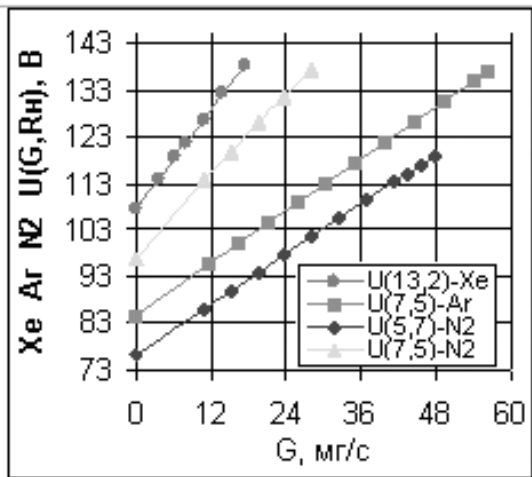
Экспериментальные данные показали, что в диапазоне расходов газа  $\Delta G = 0 \div 20 \text{ мг/с}$  изменение  $\Delta R_{\text{т}}$  возможно в пределах 4,6—8,1 кОм. Средняя по диапазону чувствительность устройства равна  $\sim 175 \text{ Ом}/(\text{мг} \cdot \text{с}^{-1})$ . Защита выходного сигнала от помех осуществляется путем его преобразования из омической формы в частотную:  $R_{\text{т}}(G) \rightarrow f(G)$ .

Процесс конвективной теплоотдачи в расходомере постоянной мощности не оптимизирован — рост интенсивности теплоотдачи компенсируется таким уменьшением температурного напора, чтобы произведение  $\alpha(G) \cdot \vartheta(G)$  оставалось постоянным независимо от расхода. Для оптимизации процесса нужно зафиксировать температурный напор  $\vartheta_0 = q(G) / \alpha(G) = \text{const}$ . Это возможно при переходе к схеме расходомера с постоянным температурным напором. В этом устройстве процесс роста интенсивности теплоотдачи с увеличением расхода будет сопровождаться прямо пропорциональным ростом мощности косвенного нагрева за счет изменения силы тока косвенного нагрева  $I_{\text{к.н}} = I_{\text{к.н}}(G)$ , которая и будет выходным сигналом. Достоинством расходомера с постоянным температурным напором является неизменность температурных условий измерений независимо от величины расхода ( $\vartheta_0 = T_0 - T_{\text{п}} = \text{const}$ ) и линейность расходных характеристик. Недостатком является малая чувствительность:  $S_I = dI_{\text{к.н}}(G) / dG \sim 0,35 \text{ мА}/(\text{мг} \cdot \text{с}^{-1})$ . Для устранения этого недостатка последовательно со спиралью измерительного термистора (ТЧЭ<sub>с</sub>) подключается нагрузочное сопротивление  $R_{\text{н}}$ , и снимаемое с него напряжение  $U_{\text{н}}(G) = I_{\text{к.н}}(G)R_{\text{н}}$  становится выходным сигналом. Таким образом, выходной сигнал и чувствительность расходомера увеличиваются автоматически в  $R_{\text{н}}$  раз без использования схем усиления.

Величина  $R_{\text{н}}$  рассчитывается по задаваемому значению чувствительности:  $(S_U)_{\text{задав}} = R_{\text{н}} \cdot S_I$ . Например, задавая чувствительность  $(S_U)_{\text{задав}} = 1 \text{ В}/(\text{мг} \cdot \text{с}^{-1})$  для  $N_2$ , Ar и Xe получим, соответственно, значения  $R_{\text{н}} = 5,7; 7,5$  и  $13,6$  кОм. Экспериментальные расходные характеристики устройств с выходными сигналами в миллиамперах и в вольтах представлены на рис. 4, а и б соответственно. Видно, что токовые характеристики для азота при



а)



б)

Рис. 4. Характеристики расходомера:  
а — с постоянным температурным напором;  
б — с задаваемой чувствительностью

разных величинах  $R_n = 5,7; 7,5$  кОм, как и следовало ожидать, практически совпадают. Характеристика для Хе («вольтова» форма) лежит выше характеристик и  $N_2$ , и Ar. Функции, аппроксимирующие характеристики (в вольтовой форме), имеют вид

$$U(5,7)_{N_2} = (0,89G + 76,88) \text{ В};$$

$$U(7,5)_{N_2} = (1,42G + 97,66) \text{ В};$$

$$U(7,5)_{Ar} = (0,93G + 86,07) \text{ В};$$

$$U(13,2)_{Xe} = (0,972G + 107,84) \text{ В}.$$

Анализ этих выражений позволяет сделать несколько заключений:

- изменяя величину  $R_n$ , можно задавать значения чувствительности и начальную величину выходного сигнала для азота  $S_U = 0,89; 1,42$  В/(мг·с<sup>-1</sup>),  $U_0 = 76,88; 97,66$  В при  $R_n = 5,7; 7,5$  кОм;

— диапазон изменения сигнала  $\Delta U \sim 50$  В не зависит от рода газа.

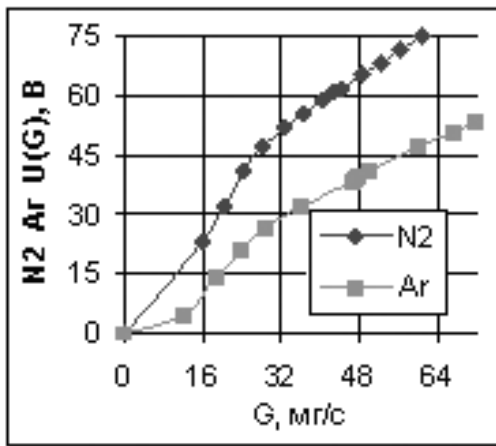
Таким образом, экспериментально подтверждена возможность с одинаковой, произвольно задаваемой чувствительностью измерять расход газов независимо от их теплофизических свойств. В случае двух измерительных термисторов (4-канальная схема) запараллеливание их нагревателей позволит удвоить значения чувствительности (2 В/(мг·с<sup>-1</sup>)) при одновременном увеличении напряжения питания с 150 до 300 В.

Еще более эффективным способом оптимизации тепловых процессов в расходомере будет организация такого теплового режима, при котором с ростом расхода газа интенсивность теплоотдачи будет сопровождаться уменьшением мощности тепловыделения в измерительном термисторе, т.е. при разнонаправленном характере процессов теплоотдачи и тепловыделения. Для реализации этого способа используется термистор без косвенного нагрева типа СТ1-18. При включении его в схему резистивного деления напряжения с  $U_0 = \text{const}$  и с  $R = R_r(T_0)$  напряжение на элементах схемы в точке равновесия (при расходе газа  $G = 0$ ) станет одинаковым:  $U_r(0) = U_R(0) = U_0/2$ . При подаче газа температура термистора будет уменьшаться, а его сопротивление — расти. Это приведет автоматическому перераспределению напряжения между элементами схемы и к уменьшению выделяющейся в термисторе мощности, которая становится функцией его температуры. Падение напряжения на элементах схемы будет изменяться в пределах

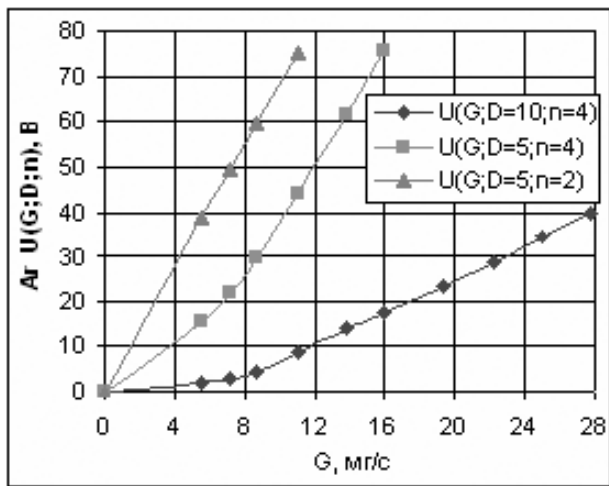
$$U_0/2 \leq U_r(G) \leq (U_r(G))_{\text{max}} \text{ и } 0 \leq U_R(G) \leq U_0/2.$$

Выходной сигнал формируется как разность падения напряжений на элементах схемы:  $U(G) = U_r(G) - U_R(G)$ . Это обеспечивает в два раза большую, по сравнению с «мостовой схемой» измерения, чувствительность ( $dU_r/dG > 0$ , и  $dU_R/dG < 0$ ).

Термистор СТ1-18 представляет собой шар ( $d = 0,5$  мм) с двумя креплениями-выводами длиной  $\sim 15$  мм. Такой маленький размер датчика позволяет использовать метод диафрагмирования проходного сечения каналов, что наряду с изменением числа каналов позволяет повышать чувствительность расходомера переменной мощности и изменять верхний предел диапазона измерения расхода. Расходные характеристики такого устройства представлены на рис. 5. Из анализа графиков на рис. 5, а видно, что у четырехканального расходомера доступный для измерения диапазон расхода  $\Delta G \sim 60 \div 70$  мг/с, а диапазон изменения выходного сигнала равен  $\Delta U \sim 70 \div 60$  В, т.е. такой же, как



a)



a)

Рис. 5. Характеристики расходомера переменной мощности:

a — 4-канальный; б — с разными диаметрами и числом каналов

и у расходомера с  $(S_U)_{\text{задв}}$ . На рис. 5,б показано, что диафрагмирование каналов ( $D_k = 5$  мм вместо 10 мм) понижает  $G_{\text{max}}$  до 16 мг/с, а чувствительность повышается с 1,43 до 5 В/(мг·с<sup>-1</sup>). Уменьшение числа каналов с четырех до двух понижает  $G_{\text{max}}$  до 12 мг/с, а чувствительность повышается с 5 до 6,67 В/(мг·с<sup>-1</sup>), при этом расходная характеристика становится линейной. К достоинству данного метода следует отнести и то, что и диафрагмирование, и уменьшение числа каналов приводят суммарно к увеличению выходного сигнала: при  $G_{\text{max}}$  вместо 40 В он становится равным 80 В, т.е. удваивается. Особенно заметно это увеличение (более чем в десять раз) в области малых расходов ( $G \leq 8$  мг/с).

Методики проведения эксперимента и обработки результатов обеспечивают замкнутый характер метода определения расхода газа благодаря тому, что по экспериментальным данным можно найти

коэффициент теплоотдачи термистора, имеющего форму шара.

Знание мощности внутреннего тепловыделения, температуры термистора и омывающего его потока позволяют найти  $\alpha(G) = q(G) / \vartheta(G)$ , числа Рейнольдса и Грасгофа и, следовательно, числа Нуссельта (Nu). Это дает возможность:

— сопоставлять расходные характеристики, имеющие разный вид выходного сигнала (например, выраженные в Ом, мА, В);

— оценить объективность экспериментальных данных путем сравнения чисел Нуссельта (или  $\alpha(G)$ ), рассчитанных по результатам эксперимента

$$Nu(G)_s = Nu(0) \cdot \vartheta_0 / \vartheta(G);$$

$$Nu(G)_s = Nu(0) [U(G)/U_0]^2$$

и известным критериальным соотношениям.

Реализация этой процедуры показала хорошее согласие между числами Нуссельта, найденными в случае выходных сигналов разного вида (кОм, мА, В), что и является свидетельством объективности экспериментально полученных расходных характеристик расходомеров, работающих в разных тепловых режимах. Важно, что числа  $Nu(d=1)$  и  $Nu(d=0,5)$ , найденные для термисторов с разными диаметрами, согласуются в среднем в пределах ~ 3%, что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

Различные условия эксплуатации расходомера могут приводить к изменению ориентации его оси в пространстве, что может повлиять на точность измерения в области малых чисел Рейнольдса. В связи с этим необходим учет влияния термогравитационного компонента естественной конвекции.

Для исключения ориентационной зависимости показаний расходомера и контроля качества работы системы терморегулирования (СТР), двухканальная схема газодинамического тракта дополняется еще двумя каналами так, чтобы газовый поток поступал в каналы с одинаковым функциональным назначением в противоположных направлениях. В результате газодинамический тракт будет иметь четыре идентичных канала, в каждом из которых размещены идентичные теплочувствительные элементы. В измерительных каналах ТЧЭ<sub>G</sub>, электрически соединенных последовательно, омываются противоположно направленными потоками, чем и обеспечивается ориентационная независимость показаний расходомера. В любом другом из оставшихся каналов размещается ТЧЭ<sub>T</sub>, включенный в качестве управляющего элемента в СТР. В последнем канале размещается ТЧЭ<sub>T</sub>, который принимает температуру газового потока  $T_{\text{п}}$ , и по его со-

противлению контролируется качество работы системы термостабилизации теплоносителя.

Исследование ориентационной зависимости с расходомером постоянной мощности показало отсутствие зависимости показаний устройства от угла отклонения его оси от горизонтали. Результаты опытов с расходомером переменной мощности позволяют заключить, что эта зависимость наблюдается лишь в области расходов до 5 мг/с. Для иллюстрации этого в таблице приведены значения полу-

ранный уровень  $T_{п}$ , а температура измерительных термисторов доводится до  $T_0 = 348$  К. Открытие отсечного клапана должно происходить одновременно с подачей ксенона в двигатель. Сопоставление показаний расходомеров позволяет оценить герметичность арматурной части стендовой системы подачи ксенона с точки зрения утечек газа. В качестве зачетных принимаются показания расходомера, находящегося в вакуумной камере стенда.

**Зависимость от угла ориентации  $\beta = (-90...+90)$  выходного сигнала четырехканального расходомера**

$G/2$ , мг/с	0	2,15	3,01	4,09	5,16	6,02	7,10	8,17	9,03	10,1
$[U(+90+90)]/2$ , В	0	5,46	11,63	19,12	27,42	34,64	42,72	51,91	59,48	67,04
$U_{изм}$ , В	0	5,52	12,02	19,16	27,30	35,18	43,01	51,94	59,21	67,04
$U_{средн}$ , В	0	5,49	11,83	19,14	27,36	34,19	42,87	51,93	59,35	67,04

суммы выходных сигналов от каждого из последовательно соединенных термисторов  $[U(+90) + U(-90)]/2$  и измеренного непосредственно суммарного падения напряжения. Сравнение данных по столбцам таблицы показывает отсутствие систематического характера в их изменении, а отклонение полусуммы сигналов от измеренного суммарного значения не превосходит  $\sim 1\%$ .

Были проведены исследования работы расходомеров в условиях, имитирующих условия их функционирования в вакуумной камере испытательного стенда. Различие в результатах, полученных в вакуумной камере ( $p \sim 5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст.) и вне ее при атмосферном давлении, не носило систематического характера и не превышало в среднем  $\sim 0,3\%$ .

Для исследования влияния электромагнитных помех при работе ЭРД на показания устройства расходомер помещался в вакуумную камеру напылительной установки, в схеме которой имелись два ускорителя плазмы — импульсного и непрерывного действия мощностью 1,5 кВт при ускоряющем напряжении 5 кВ. Обнаруженная помеха с уровнем 5 мВ на частоте 1Гц не повлияла на выходной сигнал расходомера, величина которого — десятки вольт.

С учетом полученных результатов было сформулировано предложение по использованию моделей расходомеров в системе измерения стенда ОКБ «Факел». Расходомеры переменной мощности или с задаваемой чувствительностью размещаются так: один вне камеры, второй вместе с отсечным клапаном в камере стенда непосредственно на входе в блок управления расходом двигателя. При открытом клапане производится продувка всей системы ксеноном, после чего отсечной клапан закрывается. С помощью регулировок у обоих расходомеров настраивается система термостабилизации на выб-

### Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

— разработанные модели расходомеров не имеют аналогов и в полной мере удовлетворяют всем сформулированным требованиям к перспективным показателям расходомера;

— исследованные устройства позволяют обеспечить однозначность результата измерения расхода благодаря независимости показаний расходомера от внешних условий при проведении испытаний на стенде и снизить погрешность измерения расхода до 1,74% при калибровке с погрешностью 1,7%, и до 0,4% при калибровке с погрешностью 0,3% (с использованием перспективной системы калибровки, которая готовится к эксплуатации в ОКБ «Факел»);

— имитационные эксперименты с расходомерами подтверждают их пригодность для использования в системе измерения расхода испытательного стенда электрореактивного двигателя.

### Библиографический список

1. Модель космоса: Научно информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.М. Панасюка, Л.С. Новикова. — М.: КДУ, 2007.
2. Квасников Л.А., Латышев Л.А., Пономарев-Стенной Н.Н. и др. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2001.
3. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагойда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 2008.
4. Manzella D.H., Jacobson D.T., Jankovsky R.S. High voltage SPT performance // AIAA 2001-3774, 37th Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, July 8-11, 2001.

Московский авиационный институт  
Статья поступила в редакцию 10.02.2009