

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕЧЕЙСКАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРОБНОГО ГАЗА В МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ

Мясников В.М., Виноградов С.В., Лобаев А.Н., Тараненко Е.В.

*Дзержинский политехнический институт Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, Дзержинск
Дзержинск, Россия (606000, г. Дзержинск, ул. Гайдара, 49) e-mail: sekretar @dfngtu.nnov.ru*

При использовании баланса потоков пробного газа, поступающего в вакуумную систему масс-спектрометрического течеискателя, и потока, образованного в результате откачки форвакуумным насосом, получена математическая модель, описывающая процесс массопереноса пробного газа в вакуумной системе течеискателя. Установлены зависимости изменения давления пробного газа в анализаторе масс-спектрометрического течеискателя для схем прямотока и противотока. В вакуумной системе течеискателя используется турбомолекулярный насос с изменяющейся частотой вращения ротора. Найдена возможность оперативного определения прямой и обратной проводимости турбомолекулярного насоса и быстроты действия форвакуумного насоса по характеристикам переходных процессов, описывающих изменение парциального давления в анализаторе, используя схемы подачи анализируемой пробы в режиме прямотока и противотока в вакуумную систему масс-спектрометрического течеискателя.

Ключевые слова: течь, масс-спектрометрический метод контроля герметичности, прямая и обратная проводимость, локализация течей, пробный газ, течеискатель.

THE INFLUENCE OF OPERATION FACTORS OF VACUUM SYSTEM OF LEAK DETECTOR ON THE CHARACTERISTIC OF CHANGE IN TRIAL GAS PRESSURE IN THE MASS SPECTROMETER ANALYZER

Mjasnikov V.M., Vinogradov S.V., Lobaev A.N., Taranenko E.V.

*Dzerzhinsk Polytechnic Institute of Nizhegorodsky State Technical University of R.E.Alekseev, Dzerzhinsk
Dzerzhinsk, Russia (49 Gaydar Street, Dzerzhinsk, 606000) e-mail: sekretar @dfngtu.nnov.ru*

Using the balance of trial gas streams arriving at the vacuum system of mass spectrometer leak detector and a stream formed as a result of roll-out by a forepump a mathematical model describing the process of mass transfer of trial gas in vacuum system of leak detector is received. Dependence of change in trial gas pressure in the analyzer of mass spectrometer leak detector has been defined for schemes of forward flow and backflow. A turbo-molecular pump with changing frequency of cylinder barrel rotation is used in vacuum system of leak detector. Possibility of operative definition of direct and return conductivity of a turbo-molecular pump and the speed of a forepump action are established under characteristics of the transients describing the change of partial pressure in the analyzer using the schemes of forward flow and backflow.

Keywords: leak, mass spectrometer method of tightness monitoring, direct and return conductivity, leaks localization, trial gas, leak detector.

Достоверность результатов контроля герметичности и точность определения координат течи, получаемые на стадии обработки дефектоскопического сигнала, достигаются за счет наличия полной информации о переходном процессе, описывающей перенос пробного газа от течи до анализатора пробного газа. В течеискателе масс-спектрометрического типа переходный процесс характеризуется нарастанием парциального давления пробного газа в анализаторе с момента подачи потока пробного газа в вакуумную систему течеискателя. Модель переходного процесса можно получить аналитически или экспериментально. Некоторые параметры, входящие в модель, являются постоянными, другие изменяются операто-

ром при смене режима контроля, а некоторые параметры произвольно изменяются во времени. Следовательно, параметры, используемые при обработке дефектоскопической информации, необходимо регистрировать с целью корректировки их в исходных данных алгоритма.

Для поддержания рабочего давления в анализаторе масс-спектрометрического течеискателя используют турбомолекулярный насос [6]. Если в вакуумную систему поступает поток анализируемой пробы, обеспечивающий допустимое давление в анализаторе, то измерения потока пробного газа осуществляются по схеме прямотока, в противном случае применяется схема противотока [3,6]. При локализации течи в автоматизированном режиме необходимо иметь оперативный метод определения быстроты действия форвакуумного насоса, а также прямой и обратной проводимости турбомолекулярного насоса.

Целью настоящей работы является исследование влияний основных параметров масс-спектрометрического способа контроля на характер переходного процесса, связанного с нарастанием в анализаторе парциального давления пробного газа с момента его подачи в вакуумную систему.

Для решения поставленной цели необходимо выбрать метод моделирования процесса массопереноса анализируемой пробы, поступающей в вакуумную систему течеискателя, и на его основе разработать математическую модель, описывающую изменение парциального давления пробного газа в анализаторе течеискателя.

Для получения модели процесса массопереноса анализируемой пробы авторы использовали классические методы, применяемые в расчетах вакуумных систем. В частности, откачное действие турбомолекулярного насоса определялось на основе разделения геометрической проводимости решетки ротора на обратную и прямую динамические проводимости [1, 2, 4]. Обоснование выбранных методов, позволяющих получать корректные решения практических задач в области масс-спектрометрического контроля герметичности, обуславливается широким использованием их в практике течеискания.

На рис. 1 показана схема установки, поясняющая структуру вакуумной системы масс-спектрометрического контроля герметичности и физические явления, протекающие в процессе регистрации пробного газа. В структуру установки входят: турбомолекулярный насос 1 (ВМН – 150М) с изменяющейся частотой вращения ротора в пределах от 100 до 500 об/с [3], формирующий при заданной частоте вращения ротора прямую U_{12} и обратную U_{21} проводимости, а также форвакуумный насос 4 с быстротой действия S . Высоковакуумный участок 3 и форвакуумный 2 имеют объемы V_1, V_2 с парциальным давлением пробного газа в них соответственно P_1, P_2 , регистрируемым анализаторами 5 и 6. Анализатор 6 имеет собственную систему откачки и подключен к форвакуумному участку через дроссельный клапан 16. На установке можно воспроизводить схему прямотока, с этой целью через вентиль 10 в высоковакуумную магистраль 3 следует подать анализируемую пробу, а для реализации схемы противотока анализируемую пробу необходимо подать в форвакуумную магистраль 2 через вентиль 11.

Способ и устройство формирования ступенчатого импульса для снятия динамических характеристик измерительной системы течеискателя описаны в изобретении [5]. В установке способ реализуется системой коммутирующих клапанов 12, 13, 14, 15 и вакуумным насосом, а также равными по мощности источниками потока смеси воздуха и пробного газа (гелия) 7 и воздуха 8. В результате пробный газ поступает в вакуумную систему в потоке воздуха, не нарушая при этом режим течения.

Определение прямой и обратной проводимости турбомолекулярного насоса осуществлялось по методике, описанной в работе [4]. Полученные проводимости использовались для оценки соответствия экспериментальных и расчетных данных, расхождение которых не превысило $\pm 27\%$, что является удовлетворительным результатом для описания процессов, протекающих в течеискательном оборудовании.

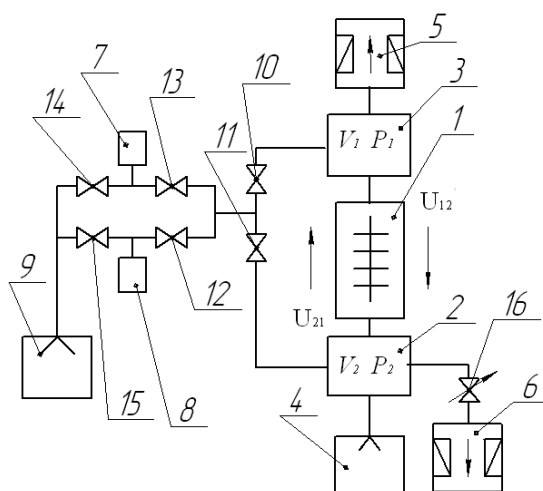


Рис. 1. Схема установки: 1 – турбомолекулярный насос; 2, 3 – форвакуумная и высоковакуумная магистрали; 4, 9 – форвакуумные насосы; 5, 6 – анализаторы; 7 – источники потока смеси воздуха и пробного газа; 8 – источник воздуха; 10, 11, 12, 13, 14, 15 – клапаны; 16 – дроссельный клапан

Математическая модель представляет систему двух дифференциальных уравнений (1), описывающих изменение парциального давления пробного газа в вакуумной системе течеискателя. Она получена на основе материального баланса потоков пробного газа, поступающих в течеискатель и на выходе из форвакуумного насоса. Область ее использования ограничена следующими допущениями: вакуумную систему рассматриваем в виде совокупности сосредоточенных объемов; процесс изменения парциального давления пробного газа считается изотермическим; в межлопаточных каналах рабочих колес турбомолекулярного насоса имеет место молекулярный режим течения газов. Схема притока реализуется при условии $Q_2(t) = 0$, а для схемы противотока – $Q_1(t) = 0$.

$$\begin{cases} V_1 \frac{dP_1}{dt} = -U_{12}P_1 + U_{21}P_2 + Q_1(t) \\ V_2 \frac{dP_2}{dt} = U_{12}P_1 - U_{21}P_2 - SP_2 + Q_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

Аналитические зависимости (2), (3), полученные из системы (1), описывают рост давления пробного газа в высоковакуумном коллекторе 3 при подаче в вакуумную систему постоянного потока пробного газа, имеющего ступенчатый характер. Зависимости не учитывают присутствие пробного газа в анализаторе в момент времени $t=0$, то есть $P_1^0=0$. Зависимость (2) характеризует динамику измерительной системы для схемы прямотока, а зависимость (3) – для противотока.

$$P_1(t) = \frac{U_{21} + S}{V_1 V_2} \cdot \frac{Q_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} - \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{V_2}{S + U_{21}} \right) e^{\lambda_1 t} + \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{V_2}{S + U_{21}} \right) e^{\lambda_2 t} \right), \quad (2)$$

$$P_1(t) = \frac{U_{21} + S}{V_1 V_2} \cdot \frac{Q_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} - \frac{e^{\lambda_1 t}}{\lambda_1} + \frac{e^{\lambda_2 t}}{\lambda_2} \right), \quad (3)$$

где λ_1, λ_2 – корни характеристического уравнения.

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{U_{12}}{V_2} + \frac{U_{21} + S}{V_2} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{U_{12}}{V_2} + \frac{U_{21} + S}{V_2} \right)^2 - 4 \left(\frac{U_{12}}{V_2} \frac{S}{V_2} \right)}.$$

На рис. 2, 3 показаны графики зависимостей, характеризующие изменение парциального давления пробного газа в анализаторе для разной частоты вращения ротора турбомолекулярного насоса ВМН – 150 М. На графиках изображены зависимости, полученные для схем прямотока и противотока.

В расчетах приняты следующие значения параметров вакуумной системы:

- быстрота действия форвакуумного насоса – $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$;
- объем высоковакуумной магистрали – $3 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3$, а форвакуумной – $2 \cdot 10^{-1} \text{ м}^3$;
- поток пробного газа – $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ Па}/\text{с}$;
- прямые и обратные проводимости удовлетворяют турбомолекулярному насосу ВМН – 150М при частоте вращения его ротора 100 (см. рис. 3) и 300 об/с (см. рис. 2).

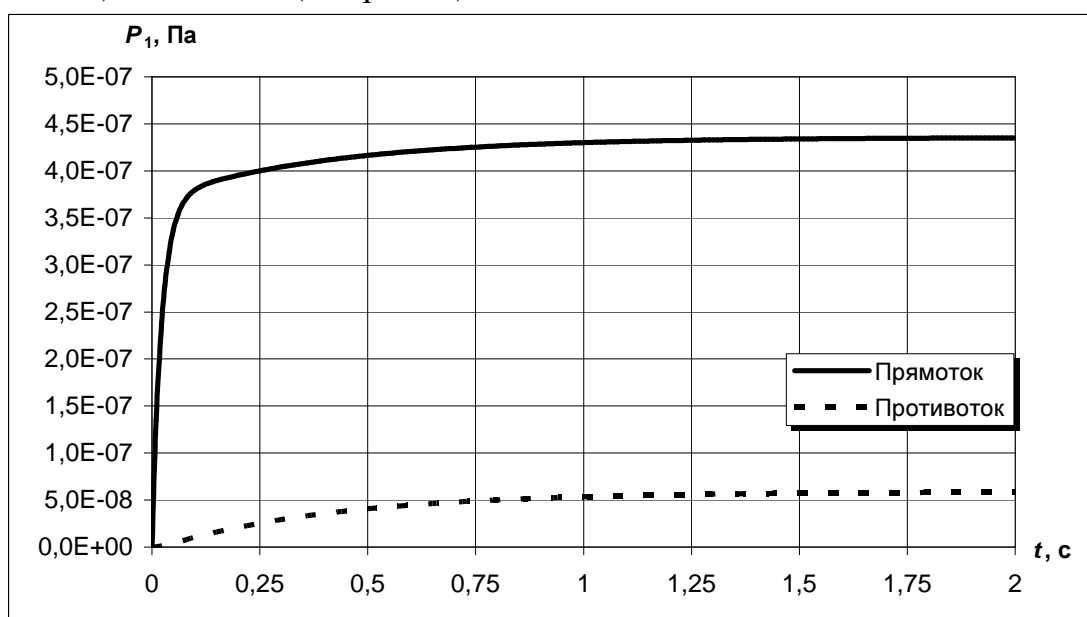


Рис. 2. Зависимости изменения парциального давления пробного газа в масс-спектрометрическом анализаторе для схем прямотока и противотока:

$$n = 300\dot{i}a / \dot{n}, U_{12} = 132.7 \cdot 10^{-3} \dot{i}^3 / \dot{n}, U_{21} = 0.78 \cdot 10^{-3} \dot{i}^3 / \dot{n}$$

Характер зависимостей изменения парциального давления в анализаторе для схемы прямотока отличается от схемы противотока скоростью нарастания давления в начальный момент времени. Это явление присутствует при разных частотах вращения ротора и усиливается с увеличением частоты вращения ротора. Вызвано это тем, что с увеличением частоты вращения ротора происходит изменение динамической проводимости решетки. В результате, прямая проводимость растет, а обратная – уменьшается [4]. Следовательно, при большой разности прямой и обратной проводимости насоса входящий поток пробного газа в высоковакуумную систему (схема прямотока) с легкостью перетекает в форвакуумную часть, и на этом этапе устанавливается баланс потоков.

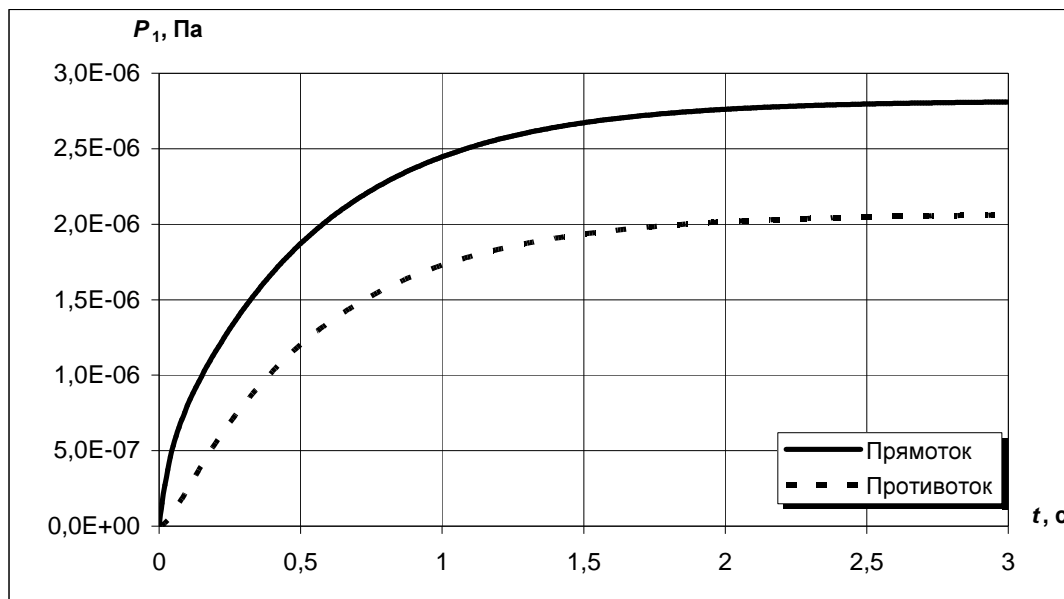


Рис. 3. Зависимости изменения парциального давления пробного газа в масс-спектрометрическом анализаторе для схем прямотока и противотока:

$$n = 100\dot{i}a / \dot{n}, U_{12} = 66.7 \cdot 10^{-3} \dot{i}^3 / \dot{n}, U_{21} = 13.8 \cdot 10^{-3} \dot{i}^3 / \dot{n}$$

На следующем этапе процесс формирования давления пробного газа в регистраторе определяет низкая быстрота действия форвакуумного насоса, которая на один-два порядка меньше прямой проводимости. Поэтому на втором этапе динамику определяет эффективная быстрота откачки вакуумной системы форвакуумным насосом. Это подтверждается графиками, полученными при реализации двух схем (прямотока, противотока), и с частотой вращения ротора турбомолекулярного насоса 500 об/с, которые смещены относительно друг друга по оси давления, но практически идентичны по форме.

Используя метод наименьших квадратов, по экспериментально полученным значениям парциального давления пробного газа в масс-спектрометрическом анализаторе при противотоке и противотоке можно определить величины прямой и обратной проводимости, а также быстроту действия форвакуумного насоса.

Заключение

По результатам проведенного анализа выбран метод моделирования процесса массопереноса пробного газа в вакуумной системе масс-спектрометрического течеискателя, основанный на материальном балансе пото-

ков пробного газа, поступающих в течеискатель и откачиваемых форвакуумным насосом. Получены аналитические зависимости, описывающие переходные процессы формирования парциального давления пробного газа в анализаторе течеискателя для схем прямотока и противотока и при разной частоте вращения ротора турбомолекулярного насоса. Установлена возможность определять в процессе контроля значения быстроты действия форвакуумного насоса, а также прямой и обратной проводимости решетки турбомолекулярного насоса.

Список литературы

1. Беляев Л.А. О расчете параметров молекулярных турбонасосов // Вакуумная техника. Вып. 1. – Таткнигоиздат, 1968. – С. 56–72.
2. Беляев Л.А., Тузанкин Ю.М. Турбомолекулярные высоковакуумные насосы и агрегаты // Вакуумная техника. Вып. 2. – Таткнигоиздат, 1970. – С. 124–129.
3. Виноградов С.В., Мясников В.М., Сажин С.Г. Исследование масс-спектрометрической установки для локализации течей с противотоковой схемой подачи анализируемой пробы // Контроль и диагностика. – 2010. – № 5. – С. 35–39.
4. Любенец В.Д., Васильев В.И., Автономова И.В., Беляев Л.А. Механические вакуумные насосы. – М.: Машиностроение, 1980. – 52 с.
5. Мясников В.М., Фадеев М.А., Сажин С.Г., Юрченко А.И. Способ определения динамической характеристики вакуумной измерительной системы при контроле герметичности изделий и установка для его реализации // В.М. Мясников. М.А. Фадеев, С.Г. Сажин, А.И. Юрченко.— А.с. № 934268. Заявлено 21.10.80; Опубл. 07.06.82., Бюлл. изобр. № 21.
6. Неразрушающий контроль: справочник: В 8 т. // Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. Т. 2. М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.

Рецензенты:

Добротин С.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Математики и естественнонаучных дисциплин» Дзержинского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Дзержинск.

Луконин В.П., д.т.н., профессор, генеральный директор ФГУП «НИИ полимеров им. академика В.А. Каргина», г. Дзержинск.