

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.521

DOI 10.34822/1999-7604-2021-2-47-52

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАТЕКАНИЯ ВОЗДУХА В ВАКУУМНУЮ СИСТЕМУ ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

А. Г. Заводовский

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

E-mail: averin117@mail.ru

Представлены результаты исследования по контролю натекания воздуха в вакуумную систему и зависимости его величины от параметров отверстия течи с помощью экспериментальной установки, созданной на основе емкостного датчика давления. Опытным путем исследован процесс натекания воздуха в вакуумную систему через различные калиброванные отверстия. Установлено, что изменение давления воздуха в системе можно описать экспоненциальной функцией, причем характер натекания для всех отверстий одинаков, изменяется только значение показателя экспоненты, зависящее от параметров отверстия. Согласно анализу полученных данных этот параметр убывает с увеличением длины отверстия и растет при увеличении его площади сечения.

Ключевые слова: натекание воздуха, вакуумная система, калиброванные отверстия, емкостной датчик давления.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF AIR LEAK INTO THE VACUUM SYSTEM THROUGH HOLES OF VARIOUS SHAPES

A. G. Zavodovskiy

Surgut State University, Surgut, Russia

E-mail: averin117@mail.ru

The paper presents the results of the control of air leaks into a vacuum system and the dependence of its value on the parameters of the leak hole. To obtain these data, an experimental installation based on a capacitive pressure sensor was created. The process of air leak into the vacuum system through various calibrated holes is experimentally investigated. It is established that the change in the air pressure in the system can be described by an exponential function. Moreover, the nature of the leakage for all holes is the same, only the value of the exponent changes, which depends on the parameters of the hole. Analysis of the obtained data showed that this parameter decreases with increasing hole length and increases with increasing its cross-sectional area.

Keywords: air leak, vacuum system, calibrated holes, capacitive pressure sensor.

Введение

Вакуумная техника широко используется в различных технологических процессах, установках по моделированию космических условий, ускорителях элементарных частиц и пр. Важным условием получения и сохранения заданной среды в рабочих объемах различных вакуумных систем является герметичность их конструкций. Герметичными являются системы, для которых натекание извне достаточно мало, чтобы мешать нормальному процессу их работы [1].

Течи могут возникать в системе из-за различных дефектов используемых материалов либо в соединениях между ними. Обычно вакуумные установки имеют большое число свар-

ных швов и уплотнений, поэтому на практике не удастся добиться полного отсутствия натекания воздуха в систему извне, однако его можно контролировать и регулировать путем поиска мест течи [2]. Контроль натекания можно осуществлять путем опытного определения скорости натекания, которая зависит от параметров отверстия. Кривые изменения давления в системе со временем могут дать представление о том, какими течами оно вызвано и какие отверстия могут его создавать [3], для чего необходимо установить связь натекания и параметров отверстия в процессе изучения натекания воздуха через различные калиброванные отверстия. В настоящее время такие численные расчеты проводятся для конкретной модели [4], поэтому так актуальны прямые экспериментальные исследования самого процесса натекания.

Для проведения эксперимента выбран метод контроля давления емкостным датчиком давления [5], в котором в качестве чувствительного элемента используется емкостной преобразователь (рис. 1).

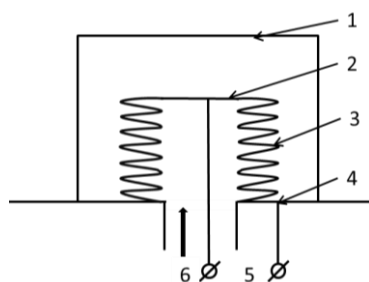


Рис. 1. Схема емкостного преобразователя датчика давления

Примечание: составлено автором.

Используемый в работе конденсатор переменной емкости находится в специальном герметичном корпусе 1 и содержит подвижную 2 и неподвижную 4 обкладки. Подвижность верхней обкладки обеспечивается наличием упругого элемента (гофры) 3. Давление воздуха 6, поступающего через входное отверстие, воздействует на подвижную обкладку конденсатора и изменяет его емкость. Через контакты 5 конденсатор включается в схему рабочего генератора и определяет его частоту.

Экспериментальная установка

Для проведения опытных исследований создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2.

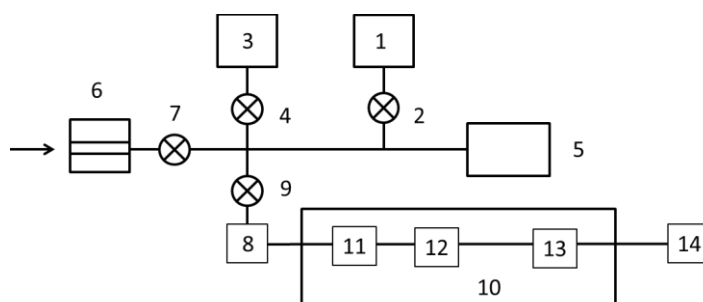


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Примечание: составлено автором.

Воздух в вакуумной системе установки откачивается с помощью форвакуумного насоса 1, подключенного к ней краном 2. Вакуумметр 3 используется для выполнения калибровочных исследований и может быть отключен от системы краном 4. В состав установки входит также баллон 5, предназначенный для увеличения общего объема системы. Воздух в систему, после его откачки на время проведения эксперимента, поступает через калибро-

ванное отверстие 6, соединенное с установкой краном 7. Емкостной преобразователь датчика давления 8 подключен к вакуумной системе установки с помощью крана 9. В измерительный прибор включен преобразователь, состоящий из трех блоков 10. Генераторный блок 11 содержит два LC-генератора: рабочий и опорный. В качестве емкостного активного элемента рабочего генератора используется преобразователь 8, емкость которого определяется давлением в системе. Опорный генератор создает сигнал постоянной частоты, близкой к частоте рабочего генератора. Сигналы с генераторов подаются в блок смесителя 12, на выходе из которого после фильтрации создается сигнал разностной частоты опорного и рабочего генераторов. Затем этот низкочастотный сигнал попадает в блок преобразователя «частота – напряжение» 13, на выходе которого формируется электрический сигнал, фиксируемый самописцем 14, который является функцией разностной частоты.

Перед началом эксперимента были выполнены калибровочные исследования для определения опытным путем рабочей характеристики датчика давления – зависимости выходного напряжения датчика от давления в системе: с помощью вакуумметра фиксировали давление поступающего в систему небольшими порциями воздуха и определяли выходное напряжение датчика. Полученные результаты представлены на рис. 3.

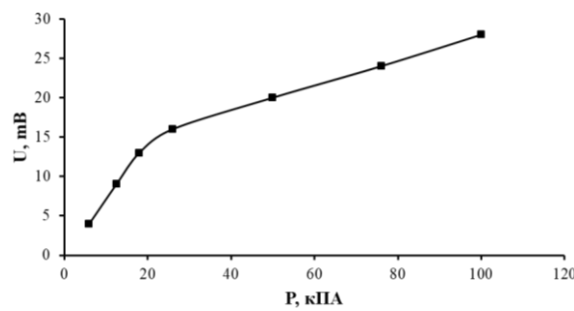


Рис. 3. Рабочая характеристика датчика давления

Примечание: составлено автором.

Анализ полученных результатов показывает, что график зависимости напряжения от давления является нелинейным, но его можно составить из двух линейных участков с разными угловыми коэффициентами. Погрешность измерения напряжения составляет 0,1 мВ, давления – 0,5 кПа.

Экспериментальные результаты и их анализ

Для определения зависимости натекания воздуха в системе от параметров отверстия выполнены опытные исследования изменения давления с течением времени для различных калиброванных отверстий. На рис. 4 представлен график зависимости $P(t)$ для капилляров круглого сечения одного радиуса r и различной длины L .

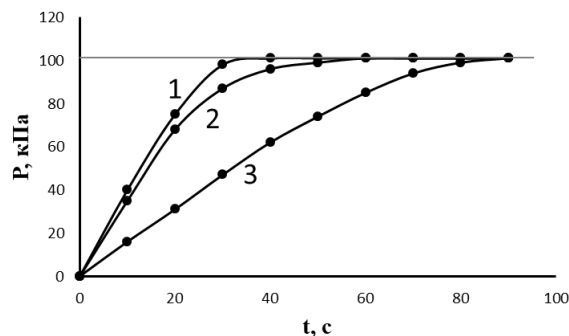


Рис. 4. Изменение давления в системе при натекании воздуха через капилляры круглого сечения ($r = 0,5$ мм, 1 – $L = 75$ мм, 2 – $L = 95$ мм, 3 – $L = 300$ мм)

Примечание: составлено автором.

На рис. 5 представлен график зависимости $P(t)$ для щелей прямоугольного сечения одной длины L и высоты h , разной ширины d .

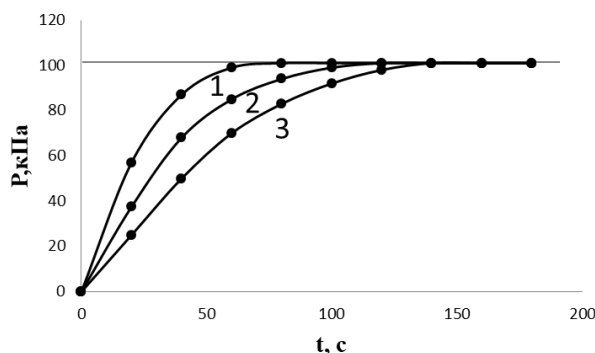


Рис. 5. Изменение давления в системе при натекании воздуха через щели прямоугольного сечения (1 – $d = 9$ мм, 2 – $d = 6$ мм, 3 – $d = 3,3$ мм, $L = 80$ мм, $h = 0,1$ мм)

Примечание: составлено автором.

Анализ экспериментальных данных показывает, что зависимость давления в вакуумной системе при натекании в нее воздуха от времени $P(t)$ можно описать выражением вида:

$$P(t) = P_a(1 - e^{-\alpha t}),$$

где P_a – атмосферное давление, α – параметр натекания, характеризующий процесс натекания.

Причем характер натекания для всех отверстий одинаков, изменяется только величина показателя экспоненты, значение которой определяется свойствами используемой экспериментальной системы. Для заданных условий эксперимента (постоянный объем вакуумной системы, постоянные температура и атмосферное давление воздуха) можно утверждать, что значение параметра натекания будет определяться только размерами отверстия. Исследование влияния на величину параметра натекания объема вакуумной системы и природы натекающего газа в данной работе не выполнялось.

Представленная на рис. 6 зависимость параметра натекания от длины капилляра при постоянной площади сечения показывает, что с увеличением длины капилляра параметр натекания линейно уменьшается.

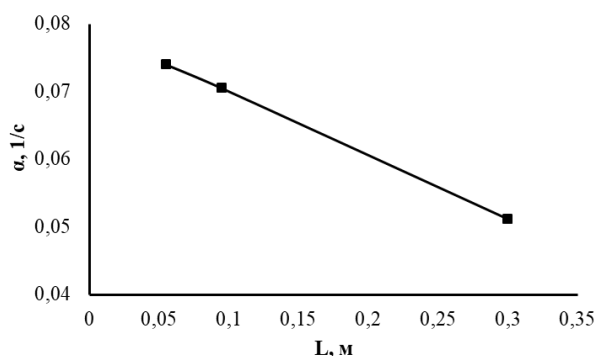


Рис. 6. Зависимость параметра натекания от длины капилляра круглого сечения ($r = 0,5$ мм)

Примечание: составлено автором.

Исследована зависимость параметра натекания от площади сечения отверстия при постоянной длине капилляра (рис. 7).

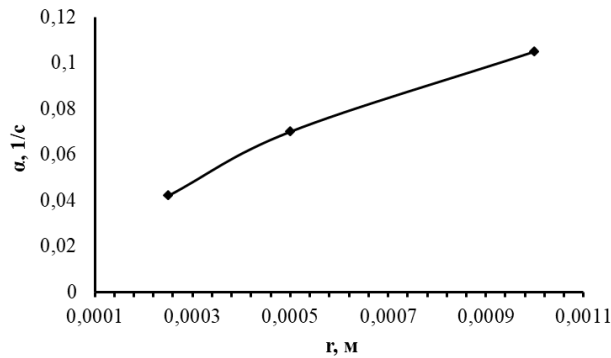


Рис. 7. Зависимость параметра натекания от радиуса капилляра ($L = 75$ мм)

Примечание: составлено автором.

Анализ опытных данных показывает, что с увеличением радиуса капилляра (площади сечения) параметр натекания увеличивается, причем эта зависимость близка к линейной. Данный факт был проверен в экспериментах со щелями прямоугольного сечения. Зависимость параметра натекания от ширины щели d представлена на рис. 8.

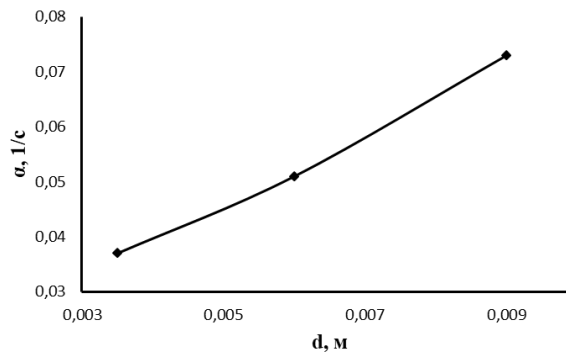


Рис. 8. Зависимость параметра натекания от ширины щели прямоугольного сечения ($L = 80$ мм, $h = 0,1$ мм)

Примечание: составлено автором.

Экспериментальные данные позволяют утверждать, что вид зависимости остается прежним: с увеличением площади сечения щели параметр натекания почти линейно увеличивается.

Заключение

Полученные результаты экспериментального исследования могут быть использованы для поиска и контроля течи в разнообразных вакуумных системах. Возможно их применение для моделирования процесса протекания воздуха через различные отверстия [6], например, для исследования процесса натекания в телах, имеющих пористую структуру, а также при анализе вакуумных испытаний различных космических аппаратов [7].

Литература

1. Вакуумная техника / под ред. К. Е. Демихина, Ю. В. Панфилова. М. : Машиностроение, 2009. 590 с.
2. Барышников В. И., Розанов Л. Н. Масс-спектрометрический контроль герметичности объектов методом натекания пробного вещества // Вакуумная техника и технология. 2019. Т. 29, № 2. С. 47–51.
3. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенченко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М. : Энергия, 1979. 504 с.

4. Чеботарев В. Е. Расчет параметров процесса истечения газа из микроотверстия гермоконтейнера космического аппарата // Космонавтика. 2015. № 1. С. 14–17.
5. Горобей В. Н., Израилов Е. К. Мембранно-емкостной преобразователь с электростатической автокомпенсацией // Вакуумная техника и технология. 2015. Т. 25, № 2. С. 49–53.
6. Савченко В. А., Столяров С. П. Аналитическое определение герметичности разъемных соединений с учетом технологии и качества обработки поверхности // Вакуумная техника и технология. 2013. Т. 23, № 1. С. 30–33.
7. Розанов Л. Н., Скрыбиев А. Ю. Распределение концентрации в собственной атмосфере космического аппарата при наличии течи // Вакуумная техника и технология. 2019. Т. 29, № 1. С. 18–22.