

## СЕКЦИЯ 2. ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

### ПРОВОДИМОСТЬ КАНАЛОВ РОТОРНОГО МЕХАНИЗМА ДВУХРОТОРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА ТИПА РУТС ПРИ МОЛЕКУЛЯРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА

### CHANNELS CONDUCTIVITY OF ROOTS TYPE VACUUM PUMP ROTOR MECHANISM IN MOLECULAR REGIME

А.А.Исаев<sup>1,2</sup>, / isaevaa050391@yandex.ru,  
А.А.Райков<sup>2</sup>, (ORCID: 0000-0001-5495-7834) / alraykov@kstu.ru  
А.В.Бурмистров<sup>2</sup>, (ORCID: 0000-0001-8612-540X) / burm@kstu.ru  
С.И.Саликеев<sup>2</sup>, (ORCID: 0000-0002-2007-4635) / salikeev\_s@mail.ru

А.А.Isaev, А.А.Raykov, А.В.Burmistov, С.И.Salikeev,

<sup>1</sup>АО «Вакууммаш»

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

*С помощью метода угловых коэффициентов, реализованного в пакете COMSOL Multiphysics, рассчитана суммарная проводимость щелевых каналов роторного механизма двухроторного вакуумного насоса типа Рутс. Проведено сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными значениями, полученными путем продувки насоса ДВН-50 при различных углах поворота роторов. Отмечается достаточно хорошая сходимость результатов расчета и эксперимента.*

*Using the method of the angular coefficients implemented in COMSOL Multiphysics total conductivity of the slotted channels by rotary mechanism of Roots type vacuum pump is calculated. The calculated data are compared with the experimental values obtained by blowing the DVN-50 pump at different rotor rotation angles. The good convergence of calculated and experimental results is observed.*

*Ключевые слова: двухроторный насос, перетекания газа, проводимость каналов, молекулярный режим.*

*Keywords: roots pump, gas flow, channels conductivity, molecular regime.*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сложно представить себе откачную систему, обеспечивающую получение среднего и высокого вакуума, без бустерных вакуумных насосов, существенно сокращающих время откачки и снижающих остаточное давление в рабочей камере. В качестве таких насосов чаще всего используются двухроторные вакуумные насосы типа Рутс, которые с учетом получаемого с их помощью безмасляного вакуума практически незаменимы.

Как известно, рабочий процесс в ДВН (рис. 1) складывается из двух составляющих: переноса роторами отсеченных объемов со входа на выход и обратных перетеканий с выхода на вход за счет перепада давлений и температур через щелевые каналы роторного механизма. Соответственно эффективность ДВН определяется именно соотношением этих двух процессов.

Величины объемов, переносимых роторами за один оборот, и величина обратных перетеканий через щелевые каналы зависят от профиля ротора. При выборе типа профиля и его геометрических параметров нужно стремиться к увеличению отсеченного объема,

переносимого роторами, т.е. к увеличению геометрической быстроты действия и снижению обратных перетеканий (проводимости) щелевых каналов.

Геометрическая быстрота НВД определяется по формуле

$$S_{\Gamma} = 2\pi R^2 L n \chi, \quad (1)$$

где  $R$  и  $L$  – радиус и длина ротора;  $n$  – частота вращения роторов;  $\chi$  – коэффициент использования рабочего объема, определяемый из соотношения

$$\chi = 1 - f_p / \pi R^2, \quad (2)$$

где  $f_p$  – площадь поперечного сечения ротора.

Таким образом, при заданных  $R$  и  $L$ , необходимо стремиться к увеличению коэффициента  $\chi$ .

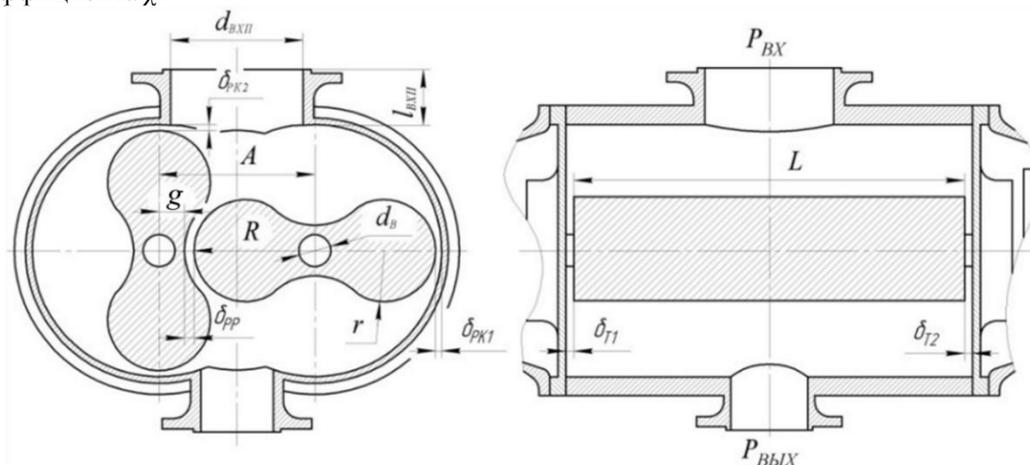


Рис.1. Схема роторного механизма ДВН.

Обратный поток через щелевые каналы характеризуется их проводимостью. Поскольку щелевые каналы ДВН включены параллельно, то суммарная проводимость определяется в виде [1, 2]

$$U_{\Sigma} = U_{PK1} + U_{PK2} + U_{PP} + U_{T1} + U_{T2}, \quad (3)$$

где  $U_{PK1}; U_{PK2}$  – проводимости радиальных каналов (между головкой ротора и цилиндрическим корпусом);  $U_{PP}$  – проводимости межроторного канала;  $U_{T1}; U_{T2}$  – проводимости торцевых каналов.

С точки зрения минимизации перетеканий оптимальным для ДВН является молекулярный режим течения в щелевых каналах, поскольку здесь проводимость минимальна. Известно, что проводимость канала произвольной формы рассчитывается по формуле [1-3]

$$U = \frac{c}{4} L \delta K_3, \quad (4)$$

где  $c$  – среднеарифметическая скорость молекул газа;  $K_3$  – коэффициент проводимости для соответствующего канала.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для нахождения проводимости каналов при молекулярном режиме чаще всего используются метод Монте-Карло (ММК) или метод угловых коэффициентов (МУК). В работах [3, 4] разработан метод расчета проводимости каналов, имеющих в некотором сечении минимальный зазор. Именно таковыми являются радиальный и межроторный каналы ДВН. Для таких каналов сопротивление определяется участком в месте минимального зазора и стенки могут быть заменены дугами окружности с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ . В работе [2] проведены продувки двухроторного насоса ДВН-50 производства АО «Вакууммаш» [5] при различных углах поворота роторов. Полученные значения проводимости по воздуху и соответствующие значения зазоров представлены в табл. Замеры осуществлялись через  $15^\circ$ . Зазоры измерялись с помощью щупов. В этой же

таблице представлены результаты расчета по методике работ [3, 4]. Проводимость торцевых каналов рассчитывалась с использованием формулы для длинной плоской щели [6]. Торцевые зазоры с двух сторон были одинаковы и составляли по 0,11мм. Среднее по углу поворота отклонение результатов расчета по методике работ [3, 4] от эксперимента составляет 13,8%.

В настоящей работе суммарная проводимость каналов ДВН рассчитывалась с помощью пакета COMSOL Multiphysics [7], в котором реализованы методы ММК и МУК. Несмотря на то, что ММК является, пожалуй, более универсальным методом, в настоящей работе расчет проводимости выполним с помощью МУК. Такой выбор объясняется спецификой исследуемых каналов – их значительной протяженностью и малой вероятностью прохождения молекул, что требует значительных затрат машинного времени.

Как известно, МУК основан на аналогии между течением газа в каналах с диффузным отражением от стенок и лучистого теплообмена в диатермических замкнутых средах. Стенки канала и поверхности входа и выхода разбиваются на элементарные площадки. От качества разбиения поверхности зависит точность учета кривизны стенок канала. Для каждой площадки рассчитывается угловой коэффициент, который представляет собой долю потока молекул, исходящего от одной элементарной поверхности и падающего на другую. Итоговая величина коэффициента проводимости определяется интегрированием потоков от всех элементарных площадок относительно входной и выходной поверхности. Наилучшую сходимость эксперимента с расчетом показал метод интегрирования Nemicube с разрешением 1024.

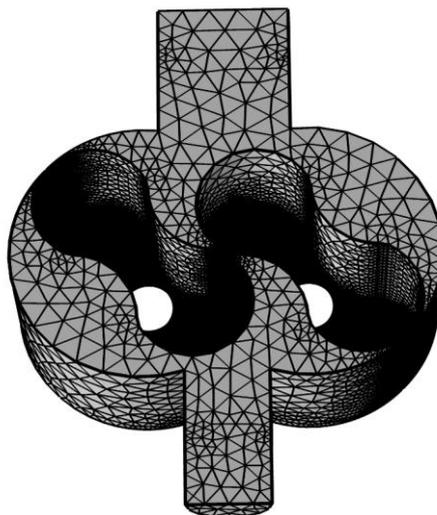


Рис.2. Расчетная область с построенной сеткой.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОСУЖДЕНИЕ**

Данные таблицы показывают, что отклонение результатов расчета в COMSOL Multiphysics имеют в два раза меньшее отклонение от эксперимента. Это связано с заменой реальной геометрии стенок канала на дуги окружности, используемой в работах [3, 4]. Само отклонение расчетов от эксперимента вызвано невозможностью точного определения зазоров в роторном механизме.

Таблица.

Суммарная проводимость каналов ДВН типа Рутс

Угол поворота роторов	Расчет по методике работ [3, 4]	Эксперимент работы [2]	Расчет COMSOL Multiphysics	Отклонение в расчета COMSOL Multiphysics от эксперимента	Отклонение по методике работ [3, 4] от эксперимента
0	0.352	0.297	0.315	-5.71%	-18.52%
15	0.587	0.45	0.501	-10.18%	-30.33%
30	1.067	1.088	1.09	-0.18%	1.93%
45	0.958	0.991	0.96	3.23%	3.33%
60	0.85	1	0.96	4.17%	15.00%
75	0.562	0.442	0.49	-9.80%	-27.15%
90	0.373	0.31	0.35	-11.43%	-20.32%
105	0.524	0.484	0.49	-1.22%	-8.26%
120	1.04	1.2	1.11	8.11%	13.33%
135	1.008	1.065	1.068	-0.28%	5.35%
150	0.903	1.18	1.11	6.31%	23.47%
165	0.644	0.6	0.621	-3.38%	-7.33%
180	0.335	0.326	0.33	-1.21%	-2.76%
195	0.718	0.678	0.69	-1.74%	-5.90%
210	1.205	1.52	1.33	14.29%	20.72%
225	1.045	1.49	1.31	13.74%	29.87%
240	1.096	1.51	1.25	20.80%	27.42%
255	0.684	0.7	0.69	1.45%	2.29%
270	0.378	0.335	0.355	-5.63%	-12.84%
285	0.577	0.458	0.491	-6.72%	-25.98%
300	1.076	1.1	1.066	3.19%	2.18%
315	1.113	1.187	1.155	2.77%	6.23%
330	1.112	1.385	1.255	10.36%	19.71%
345	0.714	0.71	0.712	-0.28%	-0.56%
Среднее	0.788	0.854	0.821	4.10%	7.73%
Среднее по модулю				6.09%	13.78%

## ВЫВОДЫ

Проведенные расчеты показали перспективность использования пакета COMSOL Multiphysics для расчетов течения газа в криволинейных каналах вакуумных насосов при молекулярном режиме. Стоит отметить, что расчеты проводились не для каждого канала в отдельности, а для всего роторного механизма ДВН в сборе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, В. И. Объемный КПД двухроторных вакуумных насосов / В. И. Кузнецов // Физика и техника вакуума. – Казань, 1974. – С. 177-185.
2. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис...докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.

3. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах: монография / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, М.Д. Бронштейн. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. -232 с.

4. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Уравнения для расчета проводимости различных видов щелевых каналов в молекулярном режиме течения // Вакуумная техника и технология. – 2004. – Т. 14, № 1. - С. 9-13.

5. НВД-200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://vacma.ru/products/roots\\_pump/nvd/382/](https://vacma.ru/products/roots_pump/nvd/382/), свободный

6. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.

7. COMSOL Multiphysics. License file for Kazan National Research Technology University c/n 9601045.

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДВУХКАМЕРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ НЕГЕРМЕТИЧНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕДУКЦИИ ДАВЛЕНИЯ**

### **USE OF PARALLEL TWO-CHAMBER MEASURING SYSTEMS FOR ESTIMATING THE DEGREE OF TIGHTNESS BY THE PRESSURE REDUCTION METHOD**

С.А.Бушин, / vnii4@vniia.ru, 2009-01-07@mail.ru

**S.A.Bushin,**

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова» (ВНИИА), г. Москва

*На основе метода редукции с принятой параллельной двухпоточной измерительной схемой представлены математические модели (уравнения измерения), описывающие при реализации разрушающего метода контроля разнесенные во времени процессы, ответственные за формирование измеряемой газовой среды при молекулярном режиме течения в объеме вскрытия, в зонах измерения и анализа для оценки ее общего и парциального давлений, с последующей оценкой общей степени негерметичности в объемах ЭВП, имеющих течи. Обозначены источники дополнительных погрешностей измерений с указанием методических неточностей, вызывающих в свою очередь появление остаточных погрешностей, учет которых нашел свое отражение в виде поправочных коэффициентов в уравнении(ях) измерения при определении величины давления пробного газа в исследуемом приборе, измеряемого с погрешностью не более  $\pm 8\%$ . Предложено апробированное методическое решение построения измерительных схем, позволяющее избежать потери чувствительности измерений, что исключает возможность пропуска малых течей при их наличии.*

*On the basis of the reduction method with the adopted parallel two-flow measuring circuit, mathematical models (measurement equations) are presented which describe, during the implementation of the destructive control method, the time-spaced processes responsible for the formation of the measured gaseous medium in the molecular flow regime in the total and partial pressures, with the subsequent assessment of the general degree of leakage in the volumes of the EEC which have leaks. Sources of additional measurement errors are shown with an indication of methodological inaccuracies, which, in turn, cause the appearance of residual errors, the*