

УДК 533.5; 621.52

С. И. Саликеев, А. В. Бурмистров, А. В. Тюрин, С. М. Пузанков Казанский национальный исследовательский технологический университет

Исследование предельного остаточного давления вакуумных насосов, применяемых в производстве изделий электроники

Представлены экспериментальные зависимости получения вакуума и определены значения предельного остаточного давления безмасляного спирального вакуумного насоса. Построены зависимости предельного остаточного давления от частоты вращения спирали. Показано, что время работы насоса, рекомендованное в ГОСТ Р54807-2011 для фиксации остаточного давления, недостаточно, что связано с длительными процессами обезгаживания и выхода насоса на стационарный режим, включая тепловую стабилизацию зазоров и внутренних перетеканий.

Спиральный вакуумный насос, остаточное давление, обезгаживание, тепловая стабилизация

Одной из актуальных задач, решаемых в связи с повышением требований к чистоте технологического вакуума в производстве изделий электроники, является замена вакуумных насосов с масляным уплотнением, например пластинчато-роторных и плунжерных, на «сухие» машины. Очевидно, что безмасляные альтернативы насосов с масляным уплотнением должны обеспечивать схожие характеристики как по остаточному давлению, так и по быстроте действия.

Из известных «сухих» насосов наиболее подходящими для этой цели являются три вида бесконтактных машин: винтовые, спиральные и кулачково-зубчатые. Современные конструкции обеспечивают предельное остаточное давление порядка 1 Па, что позволяет использовать их также в качестве форвакуумных к высоковакуумным турбомолекулярным насосам. Также все чаще выпускаются агрегаты в составе безмасляных форвакуумных и двухроторных вакуумных насосов типа Рутс.

Благодаря этому наблюдается рост объемов выпуска безмасляных форвакуумных средств откачки ведущими зарубежными производителями. К сожалению, в России ни одна из данных конструкций серийно в виде вакуумного насоса не производится.

Предельное остаточное давление уровня 1 Па в безмасляной машине может быть достигнуто лишь при радиальном зазоре порядка нескольких десятков микрометров. Обеспечить такую точность изготовления при большем, по сравнению со спиральными компрессорами, числе витков стало возможным только в конце XX в. В настоящее время практически все производимые спиральные вакуумные насосы (НВСп) имеют предельное остаточное давление 0.8...5.0 Па при частоте орбитального вращения спирали 1400...1800 об/мин. При этом для «малых» насосов характерны более высокие значения предельного остаточного давления, что связано с меньшими радиусами кривизны радиальных каналов и, соответственно, большими обратными перетеканиями.

Измерения проводились на стенде комплексных экспериментальных исследований [1], [2], вакуумная схема которого представлена на рис. 1, a (вакуумная схема стенда для экспериментальных исследований НВСп приведена в программе для моделирования работы системы: CV1 – измерительная камера; PD1 – вакуумметр деформационно-термопарный образцовый; VF1 – натекатель; G1-G6 – счетчики газовые и регуляторы расхода газа; T1-T5 – термопары; NL1 – исследуемый НВСп), с использованием в качестве объекта исследования вакуумного спирального насоса ISP-250С фирмы «Anest Iwata» (рис. 1, *б*, цифрами указаны места крепления термопар).

Давление измерялось эталонными деформационно-термопарными вакуумметрами ВДТО-3 (в диапазоне $1.33 \cdot 10^{-3} \dots 6.65 \cdot 10^3 \Pi a$ – относительная погрешность ± 10 %, в диапазоне $6.65 \cdot 10^3 \dots 1.06 \cdot 10^5 \Pi a$ – абсолютная погрешность $\pm 665 \Pi a$). Частота вращения измерялась фототахометром АКТАКОМ АТТ-6002 с погрешностью ± 0.1 %. Температура корпуса насоса контролировалась в нескольких точках хромелькопелевыми термопарами [3]. Также измерялась температура газа на входе и выходе насоса.

Предельное остаточное давление НВСп измерялось согласно методике ГОСТ Р54807–2011 (ИСО 21360:2007) «Вакуумная технология. Стандартные методы для измерения характеристик вакуумных насосов». В стандарте сказано, что для насосов, имеющих предельное остаточное давление больше 10^{-4} Па, измерительная камера откачивается при закрытых напускных клапанах в течение 1...2 ч, пока не прекратится понижение давления в камере и насос не достигнет устойчивой рабочей температуры.

Применительно к НВСп установлено, что после 2 ч работы насоса, несмотря на стабилизацию температуры, давление в измерительной камере продолжает снижаться. Стабилизация остаточного давления наступила лишь через 5 ч (и даже больше) с момента включения. Аналогичные результаты получены и для других НВСп – фирм «Busch» и «Edwards». Это связано как с продолжительным обезгаживанием стенок насоса, так и с длительным процессом выхода насоса на стационарный режим, включая тепловую стабилизацию зазоров и внутренних перетеканий между полостями через щелевые каналы с малыми зазорами.

В последние годы наметилась тенденция разработки НВСп с изменяющейся частотой орбитального вращения. Поэтому в [4]–[6] получены зависимости предельного остаточного давления от частоты орбитального движения подвижного спирального элемента и обсуждается характер данных кривых.

Во всех случаях увеличение частоты вращения вала *n* приводит к уменьшению предельного остаточного давления $p_{\text{ост}}$, а кривая $p_{\text{ост}} = f(n)$ имеет асимптотический характер. Причем примерно с n = 1000...1200 об/мин (в зависимости от величины зазора и размеров спиралей) $p_{\text{ост}}$ уже практически не изменяется.

В работе также исследовалось влияние скорости движения подвижного спирального элемента на предельное остаточное давление. Для этого на НВСп был установлен трехфазный асинхронный двигатель, частоту вращения вала которого можно было плавно изменять с помощью частотного преобразователя EI-8001-005H.

Начальная частота вращения соответствовала паспортной и составляла n = 1440 об/мин. После откачки в течение 120 мин и установления стационарной температуры во всех точках измерения (в соответствии с ГОСТ Р54807–2011 (ИСО 21360: 2007) было получено предельное остаточное давление $p_{\rm ост} = 1.27$ Па (рис. 2). Затем, не прекращая откачки и не нарушая герметичности, за счет частотного преобразователя устанавливали более низкую частоту вращения, и измерения повторяли. Время ожидания для получения каждого значения предельного остаточного давления составляло 70...120 мин. При этом насос достигал стационарной температуры в интервале 42...45 °C.





.....

13



После измерения $p_{\text{ост}}$, соответствующего n = 400 об/мин, эксперимент проводился в обратной последовательности, т. е. частота вращения ступенчато повышалась и при тех же частотах вращения, что и в первой серии, измерялось предельное остаточное давление. Время ожидания каждого измерения вновь определялось выходом насоса на стационарный тепловой режим.

Установлено, что в условиях среднего вакуума предельное остаточное давление, полученное во второй серии опытов (при повышении частоты

1. Стенд исследовательских испытаний безмасляных спиральных вакуумных насосов / А. В. Бурмистров, А. А. Райков, С. И. Саликеев и др. // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2013. Т. 16, № 14. С. 174–177.

2. Стенд для исследования масс-спектра остаточного газа безмасляных вакуумных насосов и агрегатов / А. В. Гаврилов, С. И. Саликеев, А. В. Бурмистров и др. // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2014. Т. 17, № 12. С. 129–132.

3. Кострин Д. К., Ухов А. А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.

вращения), оказалось ниже измеренного в первой серии опытов. Для n = 1440 об/мин различие составило более 40 %.

Проведенный эксперимент также позволяет сделать вывод, что для безмасляных бесконтактных насосов с малой производительностью, работающих в условиях среднего вакуума, время, необходимое для фиксации предельного остаточного давления, должно быть увеличено до 4...5 ч, по сравнению с рекомендованным ГОСТ Р54807–2011 (ИСО 21360:2007).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов для индустрии наносистем и наноматериалов» открытого публичного конкурса подбора организации на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump / Z. Li, L. Li, Y. Zhao et al. // Vacuum. 2010. Vol. 84, № 3. P. 415–421.

5. Theoretical study on the pumping mechanism of a dry scroll vacuum pump / Y. Su, T. Sawada, J. Takemotob, S. Haga // Vacuum. 1996. Vol. 47. P. 815–818.

6. Experimental verification of theory for the pumping mechanism of a dry-scroll vacuum pump / T. Sawada, S. Kamada, W. Sugiyama et al. // Vacuum. 1999. Vol. 53. P. 233–237.

S. I. Salikeev, A. V. Burmistrov, A. V. Tyurin, S. M. Pyzankov Kazan national research technological university

RESEARCH OF LIMIT RESIDUAL PRESSURE OF THE VACUUM PUMPS USED IN PRODUCTION OF ELECTRONIC DEVICES

Experimental dependences of receiving vacuum are achieved and values of limit residual pressure of the oil-free spiral vacuum pump are defined. Dependences of limit residual pressure on the frequency of rotation of a spiral are described. It is shown that the pump operating time recommended in GOST P54807–2011 for fixing of residual pressure isn't enough that is connected with long processes of outgassing and transition of the pump to the stationary mode, including thermal stabilization of gaps and internal overflowings.

Spiral vacuum pump, residual pressure, outgassing, thermal stabilization