

V. S. Goryainov, M. Khasenova, K. G. Antonenko, A. A. Buznikov  
Saint Petersburg Electrotechnical University

## A LABORATORY SETUP FOR MEASURING HYDRO-OPTICAL PROPERTIES USING A FIBER OPTICS SPECTROMETER

*Many of the components of natural waters participating in ecologically significant processes are optically active, as a result of which the optical characteristics of water bodies are associated with their ecological state and biological productivity. The study of the processes of absorption and scattering of radiation by natural waters is of great importance, including it being a basis for optical methods for remote sensing of the World Ocean from aerospace platforms. The widespread introduction of sensitive multi-element receivers based on charge-coupled devices has led to the appearance of compact and high-speed spectrometers; however, a single passage of radiation through a cell is often insufficient to isolate the characteristic features of natural water samples. In the laboratory setup developed by the authors of this paper for measuring the characteristics of attenuation and scattering of radiation by water samples, the reflection of a light beam from a vertical mirror is used to double the length of the optical path. Attenuation and scattering spectra in the range 450–900 nm with a resolution of 1 nm were obtained using a fiber-optic spectrometer. Correlations between the scattering and attenuation coefficient have been established. The features that allow distinguishing and grouping the considered natural water bodies are highlighted.*

**Natural waters, inherent hydro-optical properties, light attenuation, light scattering, fiber optics spectrometers**

---

УДК 533.59

А. Н. Соколов, М. З. Щедринский, К. В. Рыбас, В. М. Бебяков,  
А. И. Колдыба, В. А. Синькова, К. Н. Сухарев  
Филиал АО «Корпорация „Комета“» – «НПЦ ОЭН»

Л. Н. Розанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

## Многофункциональный высоковакуумный агрегат для криовакуумных систем космического применения

*При наземных испытаниях криовакуумных систем бортовой аппаратуры возникает необходимость в длительных испытаниях в составе космического аппарата. В статье представлена конструкция многофункционального высоковакуумного агрегата, включающего в себя турбомолекулярный, криоадсорбционный и магниторазрядный высоковакуумные насосы, разработанного для применения при наземных испытаниях бортовой аппаратуры космического применения. В статье приведены основные технические характеристики составных частей многофункционального высоковакуумного агрегата, вакуумная и электрическая схемы. Приводятся требования к высоковакуумным агрегатам, используемым при наземных испытаниях бортовой аппаратуры космического применения, необходимые для обеспечения непрерывного цикла испытаний космического аппарата. Представлены результаты испытаний, кривая откачки и график спектра масс газов многофункционального высоковакуумного агрегата. Приведены преимущества применения многофункционального высоковакуумного агрегата по сравнению с откачными агрегатами на базе только турбомолекулярного и форвакуумного насосов.*

**Высоковакуумный агрегат, безмасляный вакуум, масс-спектрометр, наземные испытания, криовакуумная система**

В бортовой аппаратуре космических аппаратов дистанционного зондирования Земли широко применяются криовакуумные системы, предназначен-

ные для обеспечения заданных температур фотоприемных устройств. Фотоприемные устройства размещаются внутри криовакуумных систем. Ос-

новными составными частями криовакуумных систем являются вакуумная камера и микрокриогенная система. На этапе наземной экспериментальной отработки бортовой аппаратуры в составе космического аппарата требуется обеспечение высокого вакуума в течение длительного времени внутри вакуумной камеры криовакуумной системы. На практике широкое применение при наземных испытаниях получили вакуумные откачные агрегаты на основе турбомолекулярного и форвакуумного насосов [см. лит.]. Несмотря на известные достоинства таких откачных агрегатов, они имеют ряд недостатков, существенных при работе с высокочувствительной бортовой аппаратурой космического назначения:

- наличие электрического питания и вибраций при работе;
- необходимость дежурного оператора при ночной работе бортовой аппаратуры;
- откачка только части газов из криовакуумной системы.

Для обеспечения высокого вакуума при наземных испытаниях объекта испытаний – оптоэлектронных устройств бортовой аппаратуры, размещенных внутри криовакуумной системы, и устранения указанных недостатков был разработан многофункциональный агрегат.

Перечислим основные требования, предъявляемые к современным средствам вакуумирования при наземной экспериментальной отработке оптоэлектронных устройств космических аппаратов, размещенных внутри криовакуумных систем:

- безмасляная форвакуумная и высоковакуумная откачка, по возможности, максимального спектра масс газов из криовакуумной системы;

- контроль давления и спектра масс газов при откачке;
- контроль герметичности криовакуумной системы с применением безмасляных средств откачки;
- напуск осушенного (сухого) инертного газа в откачиваемый объем объекта испытаний;
- минимальное газовыделение откачного агрегата, при этом газовыделение откачного агрегата должно быть значительно меньшим по сравнению с газовыделением объекта испытаний;
- обеспечение сохранности вакуума внутри вакуумного объема агрегата в течение длительного времени без применения откачных средств;
- обеспечение высоковакуумной откачки объекта испытаний при автономных испытаниях и при испытаниях в составе космического аппарата;
- обеспечение функционирования агрегата в течение не менее двух суток (в том числе в ночное время) без операторского контроля;
- обеспечение удобного и доступного присоединения откачного агрегата к объекту при испытаниях в составе космического аппарата.

Многофункциональный высоковакуумный агрегат (МВА) представляет собой вакуумную систему с негерметичностью не более  $10^{-10}$  м<sup>3</sup>·Па/с, включающую в себя высоковакуумную и низковакуумную части. МВА имеет передвижную силовую раму, на которой установлены откачные и измерительные устройства (рис. 1). Габариты МВА составляют: высота 1830 мм, ширина 1100 мм, длина 1300 мм. Высота откачной трубы над поверхностью земли составляет 1655 мм.

Высоковакуумная часть МВА выполнена на медных уплотнениях типа Conflat, низковакуум-

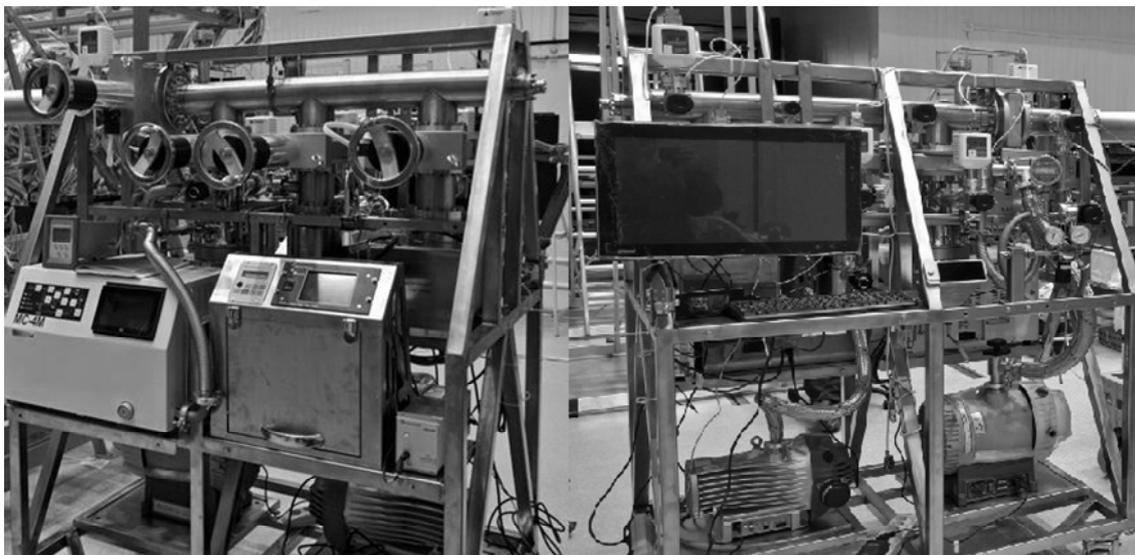


Рис. 1

ная часть – на быстроразъемных соединениях типа Klein Flange с уплотнением типа Viton. Основной вакуумный объем агрегата – это откачная труба из нержавеющей стали длиной 1 м с внутренним диаметром 95.6 мм. На откачной трубе закреплены три высоковакуумных насоса – турбомолекулярный, криоадсорбционный и магниторазрядный. Каждый высоковакуумный насос с входным диаметром Ду100 установлен через высоковакуумный затвор с уплотнением типа CF100, что позволяет производить откачку как одним насосом, так и одновременно несколькими.

В качестве основного высоковакуумного насоса в составе агрегата применен безмасляный с магнитным подвесом ротора и естественным охлаждением турбомолекулярный насос STP-iX455, имеющий встроенный контроллер. Его максимально возможное давление на выходе – 67 Па; номинальная скорость вращения – 55 000 об/мин; скорость откачки – 300 л/с по азоту и 300 л/с по водороду; максимальное рабочее давление –  $1.3 \cdot 10^{-1}$  Па; предельное остаточное давление –  $10^{-8}$  Па.

Форвакуумный безмасляный спиральный насос nXDS10i производительностью 3.2 л/с с входным фланцем KF25 и предельным остаточным давлением  $7 \cdot 10^{-3}$  мбар применен в качестве вспомогательного для турбомолекулярного насоса.

Основным форвакуумным насосом для откачки объекта испытаний служит безмасляный спиральный насос nXDS35i с максимальной производительностью 44 м<sup>3</sup>/ч с входным фланцем KF40 и предельным остаточным давлением  $10^{-2}$  мбар; дополнительными высоковакуумными насосами – криоадсорбционный и магниторазрядный.

Криоадсорбционный насос имеет среднюю быстроту действия после регенерации с прогревом до 100 °С в диапазоне давлений  $1.33 \cdot 10^{-1} \dots 1.33 \times 10^{-3}$  Па не менее 177 л/с; диапазон рабочих давлений –  $1.33 \dots 1.33 \cdot 10^{-3}$  Па.

В качестве магниторазрядного насоса применен Titan 200L в модификации CV, имеющий скорость откачки 200 л/с, давление запуска менее  $10^{-4}$  мбар и предельное остаточное давление  $10^{-11}$  мбар.

Для заполнения объекта испытаний сухим газом после проведения экспериментальной отработки, в составе агрегата использован редуктор Messer Constant 2000, позволяющий подавать сухой газ с баллона высокого давления непосредственно внутрь вакуумной камеры криовакуум-

ной системы. При этом давление контролируется по цифровому манометру ДМ5002.

На корпусе трубы установлен масс-спектрометр Extorr100M, измеряющий спектр масс газов в диапазоне от 1 до 100 а. е. м с погрешностью не более 15 %. Extorr 100M представляет собой квадрупольный анализатор остаточных газов, в котором установлены: встроенный электронный умножитель; интегрированный программно-аппаратный комплекс; датчик парциальных давлений: цилиндр Фарадея; низковакуумный датчик Пирани; высоковакуумный датчик Байарда–Альперта; источник ионов, открытый ионный источник, ионизация электронным ударом; двойной иридиевый катод. Минимальное измеряемое масс-спектрометром парциальное давление  $10^{-11}$  торр.

Для проверки объекта испытаний на герметичность в состав МВА входит течеискатель МС-4М на базе гибридного турбомолекулярного и безмасляного форвакуумного насосов с минимально регистрируемым потоком гелия  $5 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup>Па/с (паспортные данные).

Для измерения вакуума в составе МВА применены широкодиапазонные вакуумметры типа СС-10 с диапазоном измерений от 1000 до  $10^{-9}$  торр, с рабочей температурой до 50 °С.

Данные с вакуумметров, масс-спектрометра и цифрового манометра передаются через интерфейс RS-485 на панельный компьютер PPC-4211W на базе Intel 4<sup>th</sup> Generation Core I CPU i5-4300U, 2.9 ГГц.

Схема электрических соединений контрольных приборов МВА и вакуумная схема МВА приведены на рис. 2 и 3 соответственно. На рис. 3 обозначены: P1–P7 – широкодиапазонные вакуумметры со встроенным цифровым дисплеем; VP1, VP2, VP7, VP8, VP9, VP10, VP11 – клапаны вакуумные с ручным приводом; VP3–VP6 – высоковакуумные затворы; NL1, NL2 – форвакуумные насосы; NC – криоадсорбционный насос; NR – турбомолекулярный насос; NM – магниторазрядный насос; S – масс-спектрометр.

МВА обеспечивает круглосуточную работу объекта испытаний при наземной экспериментальной отработке, в том числе без контроля оператора. Наличие масс-спектрометра позволяет во время наземных испытаний бортовой аппаратуры контролировать спектр масс газов устройств внутри вакуумной системы и обнаруживать нештатные ситуации в случае разгерметизации газонаполненных электронных микросборок борто-

вой аппаратуры. Гелиевый течеискатель, входящий в состав МВА позволяет проводить испытания на герметичность криовакуумной системы во

время наземных испытаний без дополнительных монтажных работ. Применение криоадсорбционного насоса при высоковакуумной откачке объекта

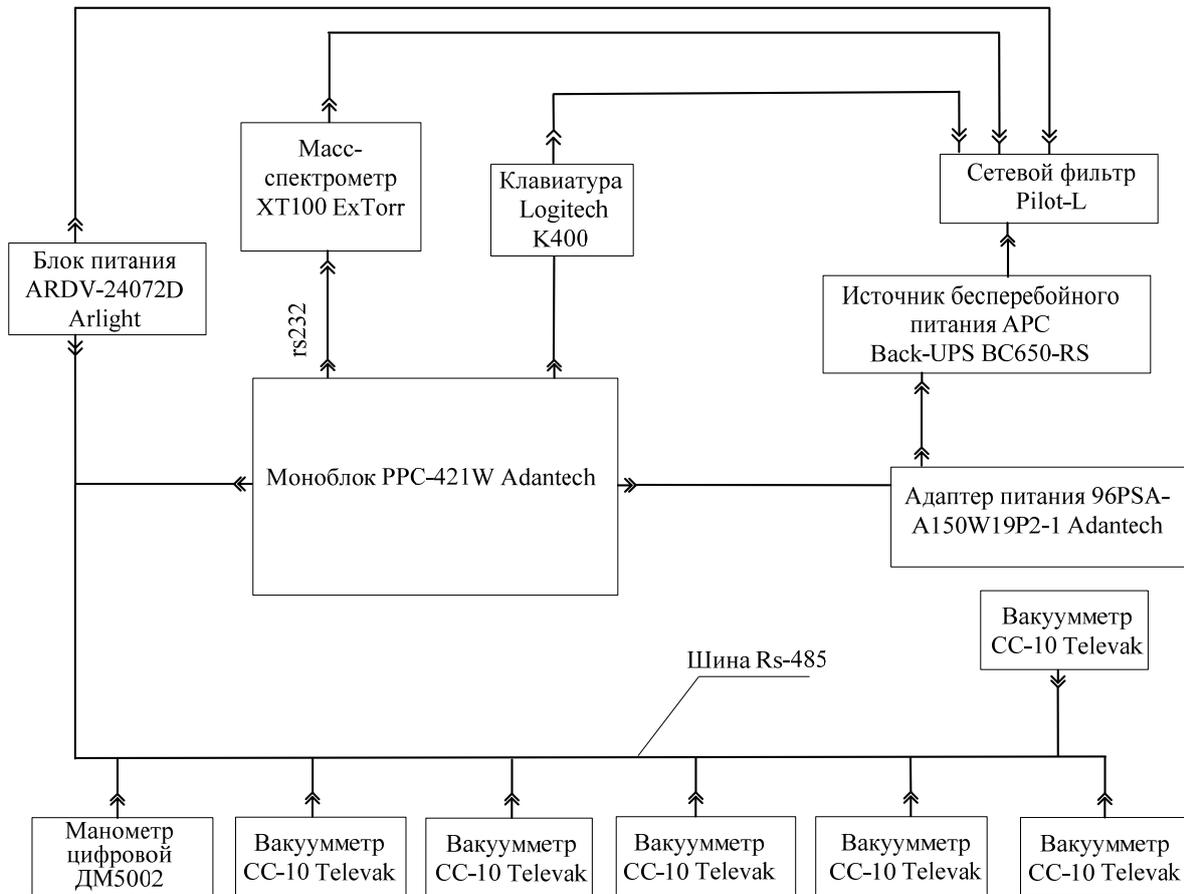


Рис. 2

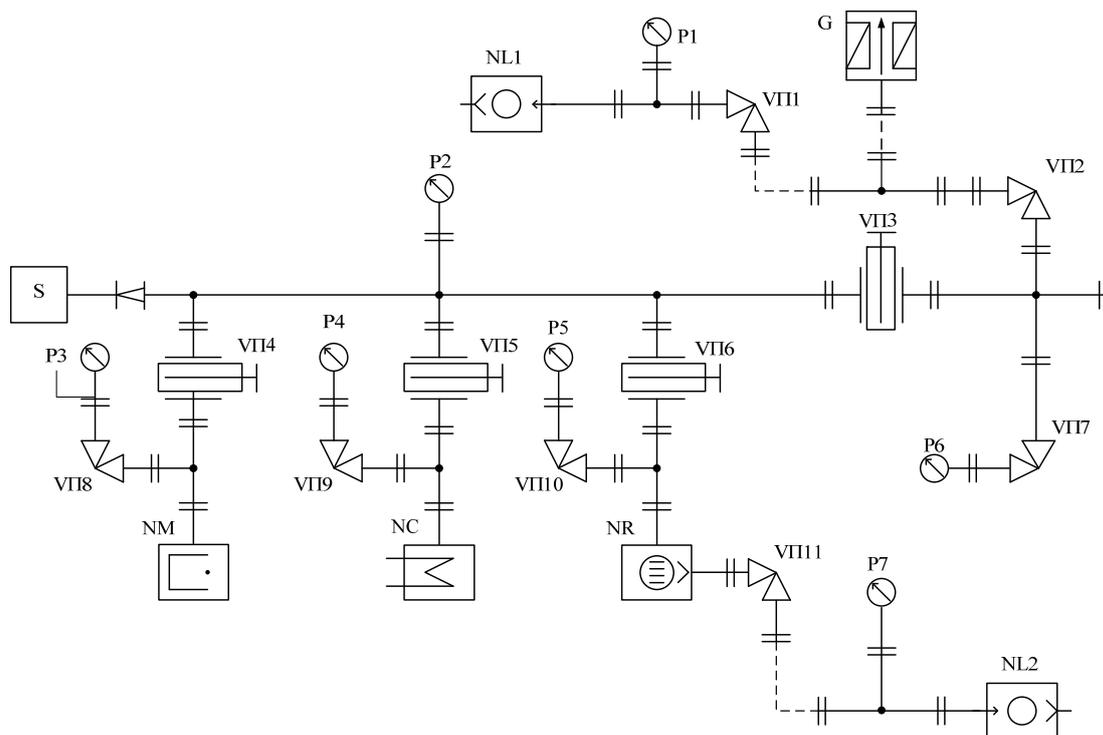


Рис. 3

испытаний обеспечивает проведение испытаний бортовой аппаратуры без дополнительных электромагнитных помех.

Отметим основные достоинства МВА:

- малое собственное газовыделение за счет применения металлических уплотнений в высоковакуумной части;
- откачная труба МВА позволяет удобно присоединять ее к откачной трубе криовакуумной системы в составе космического аппарата;
- универсальность МВА позволяет проводить операции как откачки, так и заполнения газом объекта испытаний;
- наличие инверсно-магнетронных вакуумметров позволяет поддерживать средний вакуум в течение длительного времени внутри откачной

трубы МВА при неработающих насосах, что не требует дополнительного времени на предварительную откачку МВА;

- применение различных высоковакуумных насосов, обладающих различными скоростями откачки по разным газам, позволяет обеспечить максимально возможный вакуум внутри объекта испытаний.

Результаты испытаний МВА без дополнительных мероприятий по обезгаживанию вакуумной системы приведены на рис. 4 и 5.

Кривая откачки в течение 8 ч при последовательном включении высоковакуумных насосов показана на рис. 4. Минимальное давление внутри вакуумного объема агрегата через 24 ч составило  $2.5 \cdot 10^{-8}$  торр. Спектр масс газов внутри

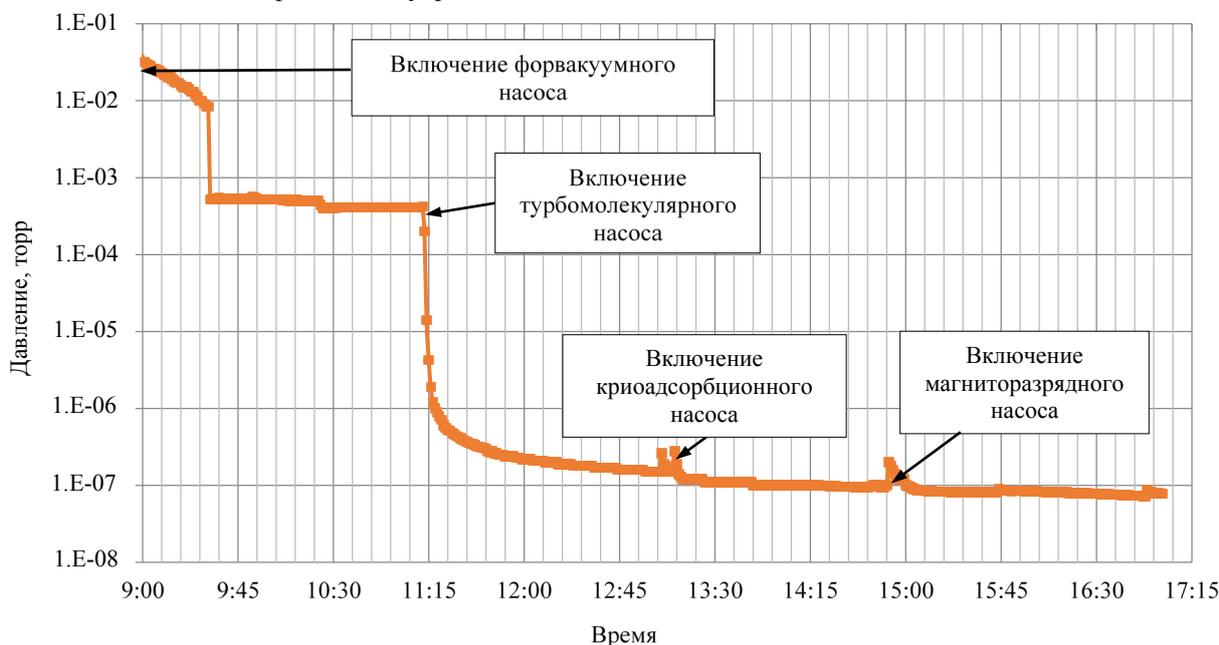
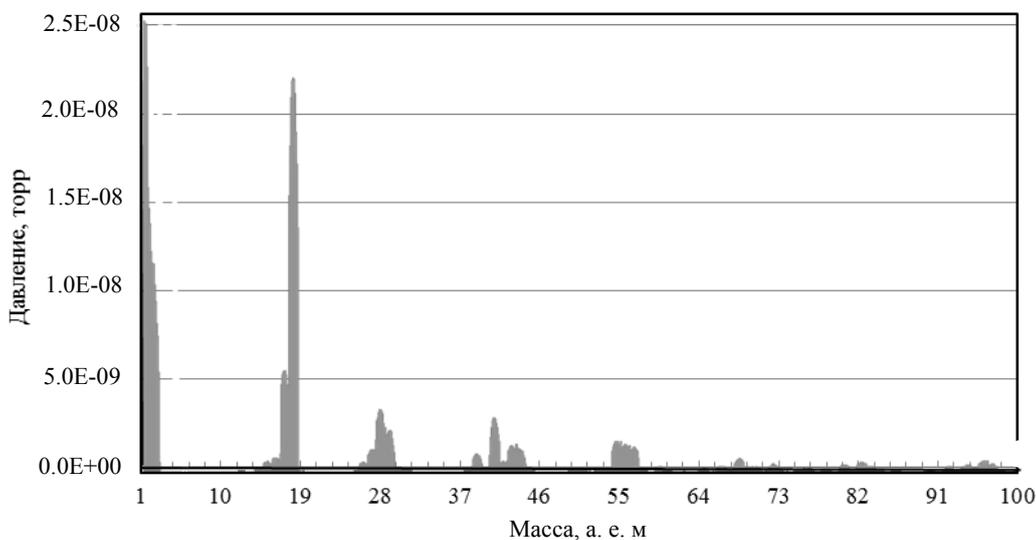


Рис. 4



вакуумной трубы при работе трех высоковакуумных насосов показан на рис. 5. Как видно из рисунка, максимальное парциальное давление имеет масса иона водорода – 1 а. е. м., кроме того, на графике можно отметить пики 18 а. е. м. и 28 а. е. м.

Время выхода на рабочий режим МВА при форвакуумной откачке до давления  $10^{-2}$  торр составляет не более двух часов, для высоковакуумной откачки до давления  $1.0 \cdot 10^{-7}$  торр составляет не более пяти часов. Предельное давление вакуумного объема МВА без прогрева составляет  $2 \cdot 10^{-8}$  торр.

Таким образом, в статье приведены требования к конструкции многофункционального высоковакуумного агрегата для обеспечения наземных испытаний бортовой аппаратуры в составе космического

аппарата, рассмотрена его конструкция и основные технические характеристики. Разработанный многофункциональный высоковакуумный откачной агрегат обеспечивает высоковакуумную откачку криовакуумных систем космического назначения в течение длительного времени объемом 100 л, контроль герметичности с минимально регистрируемым потоком гелия  $5 \cdot 10^{-13}$  м<sup>3</sup> Па/с и контроль спектра масс в диапазоне от 1 до 100 а. е. м.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Розанов Л. Н. Вакуумное технологическое оборудование: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехнического университета. 2012.

A. N. Sokolov, M. Z. Schedrinsky, K. V. Rybas, V. M. Bebyakov,  
K. N. Sukharev, V. A. Sinkova, A. I. Koldyba  
*Branch of JSC «Corporation „Kometa“»*

L. N. Rozanov  
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

## MULTIFUNCTIONAL HIGH-VACUUM PLANT FOR CRYOVACUUM SYSTEMS IN AEROSPACE APPLICATIONS

*Long-term tests as part of the spacecraft are necessary during ground tests of cryovacuum systems of onboard equipment. Article presents design of multifunctional high-vacuum plant, including turbomolecular, cryoadsorption and ion pumps, which was created for ground test of onboard equipment for space application. The main characteristics of multifunctional high-vacuum plant assembly, vacuum and electrical circuit are presented in this article. The requirements for high-vacuum plants, used in ground tests of onboard space equipment, which are necessary to provide uninterrupted test cycle of spacecraft, are given in article. Presented test results, vacuum chamber pumping curve and the mass spectrum of gases inside the vacuum pipe. Advantages of using multifunctional high-vacuum plant in comparison with using vacuum plants only with turbomolecular and scroll vacuum pumps are shown.*

**High vacuum plant, oil-free vacuum, mass-spectrometer, ground testing, cryovacuum system**