

Исследование работы геттерно-ионного сверхвысоковакуумного насоса орбитронного типа

В. Б. Лобода, В. Н. Жмайлов, М. Я. Довжик, С. Н. Хурсенко, А. В. Чепижный

В статье представлены результаты исследования работы вакуумного орбитронного геттерно-ионного насоса (ОГИН) с азотной криопанелью. Описаны конструктивные особенности ОГИН и режимы его работы. С помощью масс-спектрометра MX7304A изучен состав остаточной атмосферы металлической прогреваемой вакуумной камеры при ее откачивании с помощью ОГИН до сверхвысокого вакуума в зависимости от режимов его работы. Показано, что особенностью масс-спектров остаточной атмосферы является полное отсутствие в них пиков тяжелых углеводородов. Основной составляющей остаточной атмосферы (определяющей предельное разрежение насоса) при водяном охлаждении ОГИН является метан CH_4 . При использовании азотной криопанели при давлении в камере $P = 2 \times 10^{-8}$ Па основной составляющей остаточной атмосферы является водяной пар H_2O , и поэтому при тщательном обезгаживании вакуумной камеры использование орбитронного насоса с азотной криопанелью позволяет получать сверхвысокий безмасляный вакуум лучше 10^{-8} Па.

Ключевые слова: сверхвысокий безмасляный вакуум, орбитронный вакуумный насос, масс-спектр остаточной атмосферы.

Ссылка: Лобода В. Б., Жмайлов В. Н., Довжик М. Я., Хурсенко С. Н., Чепижный А. В. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 75.

Reference: V. B. Loboda, V. N. Zhmailov, M. Ya. Dovzhyk, S. N. Khursenko, and A. V. Chepizhnyi, Applied Physics, No. 1, 75 (2020).

Введение

Современные требования к качеству вакуумной среды, в первую очередь, к чистоте и глубине вакуума, выдвигаемые развитием электроники, спинтроники, нанотехнологий, технологий получения сверхчистых веществ и т. п., обуславливают как создание принципиально новых средств получения вакуума и

его диагностики, так и улучшение существующих.

В этом плане необходимо констатировать, что в вакуумной технике за последние 25–30 лет никаких «прорывных» разработок не произошло, несмотря на некоторые успехи, связанные в основном с миниатюризацией различных электронных устройств, применяемых в вакуумной оборудовании, и широким использованием компьютерной техники. Если же говорить о вакуумных насосах для получения и поддержания сверхвысокого (меньше 10^{-7} Па) вакуума, то из пяти основных типов вакуумных насосов, унаследованных от вакуумной техники 20-го века (диффузионные, турбомолекулярные, ионные магниторазрядные, криогенные и электрофизические), только два последних типа наиболее полно удовлетворяют требованиям к сверхвысоковакуумной технике [1–3].

Лобода Валерий Борисович, профессор, к.ф.-м.н.

Жмайлов Валерий Николаевич, профессор.

Довжик Михаил Яковлевич, доцент.

Хурсенко Светлана Николаевна, доцент.

Чепижный Андрей Владимирович, доцент.

Сумский национальный аграрный университет (СНАУ).

Украина, 40000, г. Сумы, ул. Герасима Кондратьева, 160.

E-mail: loboda-v@i.ua

Статья поступила в редакцию 28 января 2020 г.

© Лобода В. Б., Жмайлов В. Н., Довжик М. Я., Хурсенко С. Н., Чепижный А. В., 2020

Криогенные вакуумные насосы по-прежнему являются лидерами среди современных вакуумных насосов как по глубине предельного вакуума (меньше 10^{-10} Па), так и по его качеству (полное отсутствие углеводородов). Однако дороговизна, сложность получения и хранения основного хладагента для этих насосов, а именно, жидкого гелия, позволяет эксплуатировать криогенные насосы лишь в крупных научно-исследовательских центрах.

Электрофизические (по другому, геттерно-ионные) насосы тоже имеют вполне приемлемые вакуумные характеристики: предельный вакуум не хуже 10^{-10} Па при полном отсутствии тяжелых углеводородов. Насосы просты в конструктивном отношении и обслуживании, что позволяет изготавливать и эксплуатировать их и в небольших исследовательских лабораториях. При этом уже существует несколько разновидностей таких насосов и продолжается интенсивная разработка и испытание их новых вариантов.

Целью данной работы являлось исследование особенностей получения сверхвысокого безмасляного вакуума с помощью созданного нами геттерно-ионного вакуумного насоса орбитронного типа с азотной криопанелью как одного из перспективных видов электрофизических насосов.

Постановка работы

Испарительные насосы

Геттерно-ионный насос является комбинированным насосом, который объединяет в себе испарительный и ионный насосы. Откачивающее действие испарительных насосов базируется на использовании геттерных свойств пленки, полученной конденсацией термически испаренных атомов активных металлов (Ba, Ti, Ta, Mo, Mg, Hf, Zr, Er, Y). На сегодня разработано более десяти модификаций испарительных насосов, отличающихся исходными активными металлами и способами их испарения. Детальное описание конструкций и анализ особенностей механизмов откачивания таких насосов приведены в [4].

В большинстве современных испарительных насосов исходным геттерным метал-

лом является титан. Титан образует прочные нелетучие соединения и твердые растворы с атомами почти всех газов, которые есть в вакуумных системах, за исключением инертных. В 1962 г. было открыто [5], что поглощающее действие титановой пленки для большинства газов существенным образом улучшается, если она конденсируется на поверхность, охлаждаемую жидким азотом с $T = 77$ К (т. н. азотная криопанель).

Вследствие значительной селективности откачивания разных газов титановой пленкой, остаточная атмосфера титановых испарительных насосов обогащена в основном инертными газами и метаном CH_4 . Метан образуется в самом насосе во время его работы, его количество и определяет предельное давление этих насосов [4]. Поглощение метана незначительно даже при температуре титановой пленки $T = 77$ К. Заметим, что в случае откачивания смеси разных газов в процессах поглощения их молекул возникает конкуренция и дискриминация. Из-за сложности исследования этих процессов, данные разных авторов по откачке смеси газов чрезвычайно противоречивы.

Геттерно-ионные насосы орбитронного типа

В геттерно-ионных насосах откачивание газовых молекул титановой пленкой улучшается вследствие ионизации некоторой их части. Исторически первыми были созданы геттерно-ионные насосы (насосы серии ГИН), в которых испаритель титана и ионизатор газовых молекул работают независимо друг от друга и функционально не связаны между собой [4]. К сожалению, в ГИНах вследствие незначительности вероятности ионизации газовых молекул невелика и скорость откачивания инертных газов. Этот существенный недостаток ГИНов преодолен в т. н. орбитронных геттерно-ионных насосах (ОГИН). Впервые такой насос был предложен Хербом в 1965 г. [6].

Принцип работы ОГИН детально описан в работах [4, 6, 7]. В ОГИН распыление титана происходит электронно-лучевым способом, причем электроны, эмитированные разогретым катодом, используются как для распыления титана, так и для ионизации газовых мо-

лекул. Атомы титана осаждаются на внутреннюю поверхность стенки корпуса насоса, образуя на ней сорбирующую титановую пленку. Активные газы откачиваются насосом благодаря хемосорбции непрерывно возобновляемой титановой пленки. Инертные газы откачиваются насосом вследствие ионизации их атомов электронами, движущимися в полости насоса, дальнейшего ускоренного движения образовавшихся положительных ионов к отрицательно заряженной стенке корпуса насоса, последующей их имплантации в титановую пленку и «замуровыванием» в ней оседающими атомами Ti.

Электроны, движущиеся в насосе, ионизируют и определенную часть молекул активных газов и молекул тяжелых углеводородов. Образовавшиеся при этом ионы разваливаются на заряженные фрагменты-обломки, которые также сорбируются титановой пленкой по вышеизложенному механизму. Таким образом, механизм откачивания ОГИН объединяет в себе хемосорбционный механизм откачивания испарительного титанового насоса и механизм откачивания ионного насоса.

Скорость действия ОГИН в основном определяется величиной площади поверхности стенки насоса, покрытой титановой пленкой, и коэффициентом захвата [4]. Предельный вакуум ОГИН с охлаждением корпуса насоса (титановой пленки) проточной водой составляет порядка 10^{-7} Па. Использование азотной криопанели ($T = 77$ К), на которую осаждаются часть атомов Ti, позволяет получить предельный вакуум порядка 10^{-10} Па.

В 70–80-х годах прошлого столетия в СССР было разработано несколько типов ОГИН, которые выпускались в небольшом количестве [7]. В последние годы появились сообщения о разработках миниатюрных ОГИН, встраиваемых в различные электронные приборы [8, 9].

Экспериментальное оборудование

Для исследования работы орбитронного насоса была использована цельнометаллическая сверхвысоковакуумная установка. Её основными элементами являются орбитронный насос, магнитоэрозийный насос НМД-0,16, система трех адсорбционных угольных насо-

сов для создания предварительного безмасляного вакуума и цилиндрическая вакуумная камера объемом около 20 л. Конструкция установки обеспечивает независимое откачивание любого из элементов системы до предварительного вакуума 10^{-2} Па адсорбционными насосами.

Орбитронный и магнитоэрозийный насосы соединяются с вакуумной камерой вентилями ДУ-60. Корпус ОГИН, корпус магнитоэрозийного насоса, корпуса высоковакуумных вентилялей и вакуумная камера могут прогреваться до 300 °С электрическими нагревателями, а корпус ОГИН и вакуумная камера могут также охлаждаться проточной водой. Высокий вакуум в камере и насосах измеряется с помощью манометрических преобразователей типа ПММ-32 вакуумметром пульта управления установкой. Предварительный вакуум измеряется с помощью манометрического преобразователя типа ПМТ-2. Состав остаточных газов в вакуумной камере определяется монополярным масс-спектрометром типа МХ7304А.

Предельный вакуум (лучше, чем 1×10^{-8} Па) в камере создается в результате ее откачивания с обезгаживающим прогревом до 300 °С на протяжении 10–15 часов.

Конструктивные особенности орбитронного насоса

Созданный нами ОГИН, представленный на рис. 1, состоит из трех основных узлов: корпуса (1) с водяным охлаждением, фланца с электродной системой (2) и отсека (3) для азотной криопанели. Через патрубок (5) насос присоединяется к вакуумной системе, к патрубку (4) присоединяется манометрический преобразователь ПММ-32 для измерения в нём вакуума.

Анодный стержень (7) изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 2 мм, на стержне закреплен небольшой цилиндр (8) из иодидного титана. Вольфрам-рениевая нить накала катода (10) имеет диаметр 0,12 мм. В насосе размещено два одинаковых катода – рабочий и резервный. Экранная пластина (9) и экранная трубка изготовлены из нержавеющей стали. Элементы электродной системы собраны на стержнях-токовводах цоколя (11). Рабо-

чее положение насоса вертикальное с цоколем сверху (рис. 1, а, б). В нижней части насоса в специальном отсеке (3) расположена азотная криопанель (6), образованная внутренней (обращенной к аноду) поверхностью емкости для жидкого азота. Емкость изготовлена из тонкой листовой нержавеющей стали.

Атомы Ti, испарившиеся из разогретого титанового цилиндра (8), осаждаются как на боковой поверхности внутренней стенки кор-

пуса насоса (1) (водяное охлаждение), так и на внутренних поверхностях емкости с жидким азотом (охлаждение до $T = 77$ К). Емкость для жидкого азота имеет внутренний диаметр немного больший диаметра корпуса насоса для того, чтобы кусочки титановой пленки, которые со временем могут отслаиваться от стенки корпуса насоса, падали на ее дно и находились там при низкой температуре (тем самым уменьшается их газовыделение).

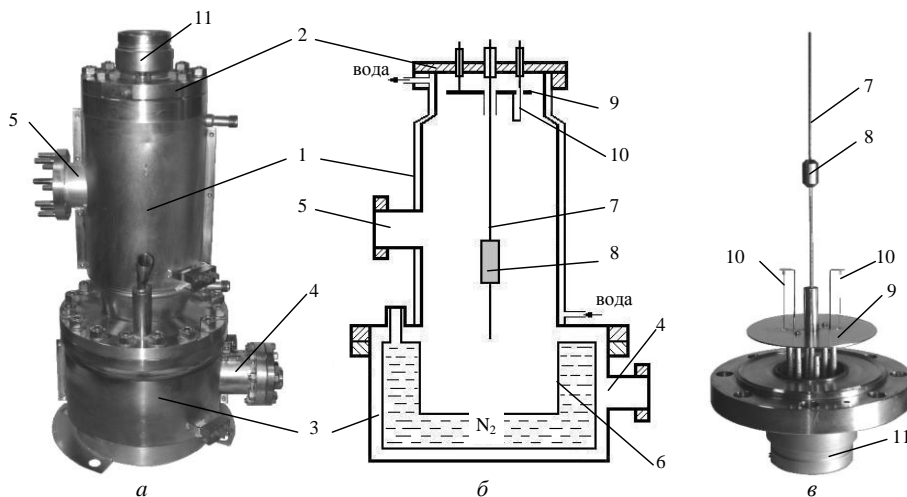


Рис. 1. Разработанный и созданный ОГИН: а) – внешний вид; б) – схематическое изображение конструкции; в) – электродная система орбитронного насоса. Обозначения: 1 – корпус; 2 – электродный фланец; 3 – отсек для азотной криопанели; 4 – патрубок для ПММ-32; 5 – соединительный патрубок; 6 – азотная криопанель; 7 – анод; 8 – титановый цилиндр; 9 – экранная пластина; 10 – катод; 11 – цоколь.

Питание насоса осуществляется от электронного блока, принципиальная электрическая схема которого аналогична описанной в работах [4, 7]. Анодное напряжение может изменяться в пределах 0–8 кВ, ток накала нити катода – в пределах 0–3,2 А.

Расчетная скорость действия насоса для воздуха составляет около 500 л/с при охлаждении корпуса насоса проточной водой и около 600 л/с при использовании ещё и азотной криопанели. Предельный вакуум насоса при охлаждении корпуса насоса проточной водой составляет 10^{-7} Па, при использовании азотной криопанели – не хуже, чем 10^{-9} Па.

Описание и анализ результатов

Вакуумные параметры насоса (скорость действия, предельный вакуум) существенно зависят от режимов работы его электродной системы. Сублимация атомов титана с поверхности титанового цилиндра происходит при определенной мощности электронного пучка, которую можно изменять тремя способами: изменением тока накала катода, изменением анодного напряжения и изменением

напряжения смещения. При малых токах накала катода количества электронов недостаточно для заметного разогревания титанового цилиндра. В этом режиме титан не испаряется, и ОГИН работает как ионный насос. Аналогичную ситуацию можно создать уменьшением анодного напряжения до $U_a = 1-2$ кВ. Таким образом, при необходимости, ОГИН можно переводить в «сторожевой» режим работы, когда нужно лишь поддерживать высокий вакуум в реципиенте с малым газовыделением.

Мощность, выделяющуюся на аноде, можно регулировать и изменением напряжения смещения U_c . При этом происходит изменение места фокусирования электронного пучка на аноде и изменение формы электронных орбит. Последнее существенно влияет на эффективность ионного откачивания.

В выключенном и отсеченном от вакуумной системы ОГИН месяцами сохраняется высокий вакуум, что позволяет запускать его без откачивания до предварительного вакуума.

Прежде чем обсудить результаты представленных на рис. 2 масс-спектрометрических исследований состава остаточной атмосферы (ОА) вакуумной камеры при ее откачки-

вании ОГИН, необходимо отметить следующее. Так как газом, который откачивается из вакуумной камеры, является воздух, то в ее ОА будут присутствовать основные составляющие воздуха – азот, кислород, аргон и водяной пар. В масс-спектре воздуха фиксируется семь основных масс-спектрометрических пиков с массами 28 а.е.м. (100 %), 32 а.е.м. (27 %), 14 а.е.м. (6 %), 16 а.е.м. (3 %) и 40 а.е.м. (1 %), которые принадлежат ионам N_2^+ , O_2^+ , N^+ , O^+ и Ar^+ соответственно (в скобках представлены проценты интенсивности пиков относительно интенсивности пика N_2),

и, кроме того, пики с массами 18 а.е.м. и 17 а.е.м., которые принадлежат ионам H_2O^+ и HO^+ соответственно. При отсутствии течи в вакуумной системе в масс-спектре её ОА отношения интенсивностей этих пиков будут зависеть, в первую очередь, от типа используемых высоковакуумных насосов. Наличие других масс-спектрометрических пиков будет зависеть от степени обезгаживания стенок вакуумной камеры, от материалов, которые использовались в конструкции вакуумной установки, от температуры стенок камеры и других узлов вакуумной системы [10].

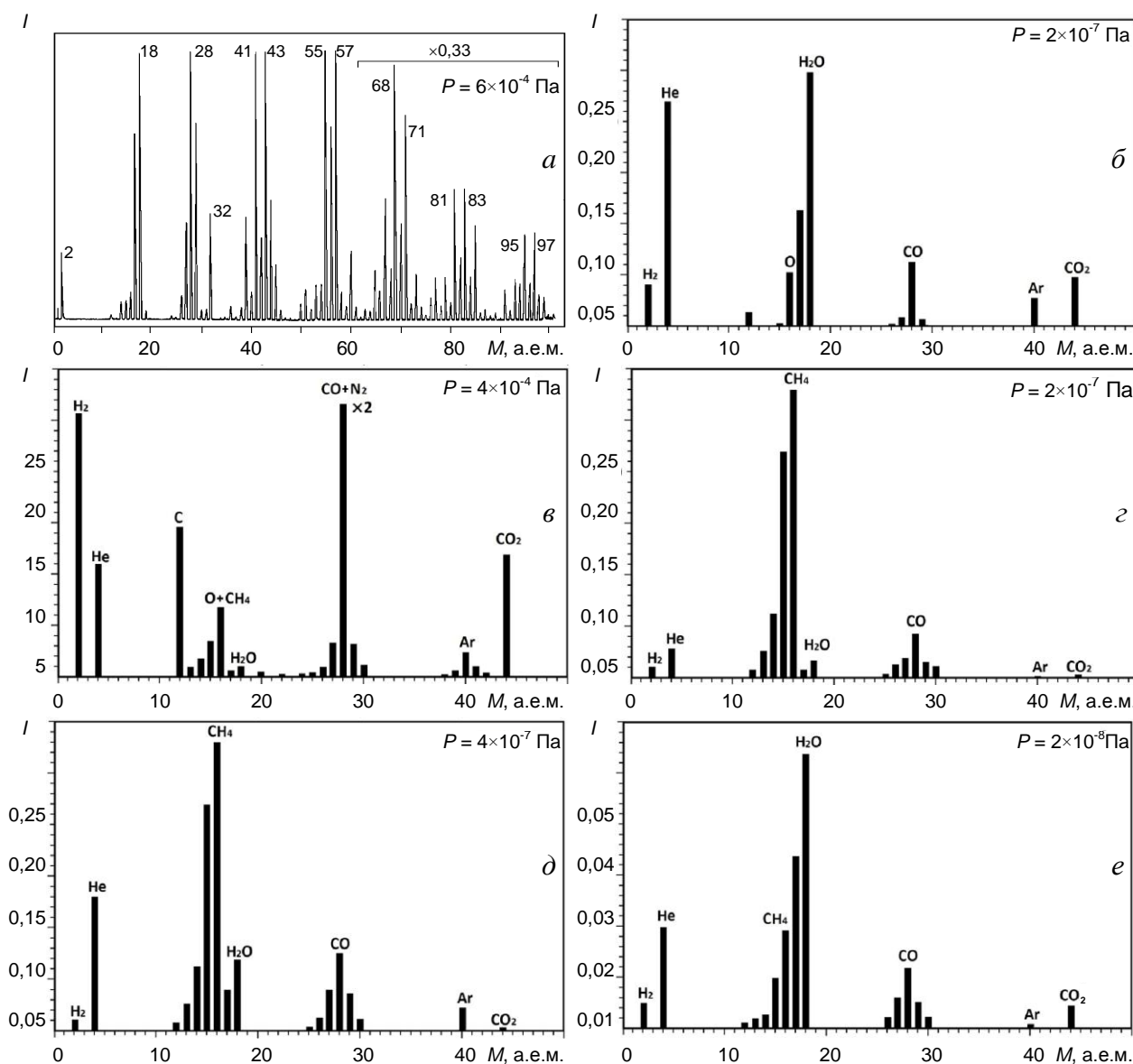


Рис. 2. Масс-спектры остаточной атмосферы вакуумной камеры при её откачивании: диффузионным насосом (а); магнитоэлектрическим насосом (б); орбитронным насосом с водяным охлаждением (в); орбитронным насосом в сторожевом режиме (д); орбитронным насосом с азотной криопанелью (е). Масс-спектр остаточной атмосферы вакуумной камеры, отсеченной от насосов (в).

На рис. 2, а представлен для иллюстрации масс-спектр состава ОА металлической вакуумной камеры при её откачивании диффузионным паромасляным насосом Н-100 с рабочей жидкостью ВМ-5. Наиболее интенсивные пики с $M > 39$ а.е.м, представленные в таблице, отвечают фрагментам органических молекул рабочих жидкостей диффузионного и механического вакуумных насосов.

Масс-спектр ОА при откачивании вакуумной камеры УВБЛ-6 магниторазрядным насосом НМД 0,16 (рис. 2, б) при $P = 2 \times 10^{-7}$ Па в камере является довольно простым. Основными масс-спектрометрическими пиками являются пик молекулярных ионов водяного пара H_2O с $M = 18$ а.е.м., пики фрагментов его молекулы с $M = 17$ а.е.м. (НО) и с $M = 16$ а.е.м. (О).

Таблица

Массовые числа и химические формулы фрагментов молекул вакуумных масел [10]

M , а.е.м	39	41	43	55	57	68	71	81	83	95	97
формула	C_3H_3	C_3H_5	C_3H_7	C_4H_7	C_4H_9	C_5H_3	C_5H_4	C_6H_9	C_6H_{11}	C_7H_{11}	C_7H_{13}

Поскольку магниторазрядные насосы имеют значительную селективность откачивания, то в масс-спектре пик с $M = 32$ а.е.м. (O_2) полностью отсутствует, зато есть пики с $M = 4$ а.е.м. (He) и $M = 40$ а.е.м. (Ar). Пик с $M = 2$ а.е.м. (H_2) в основном появляется в масс-спектре вследствие фрагментации молекулы H_2O в источнике ионов масс-спектрометра. Масс-спектрометрические пики с $M = 28$ а.е.м. и $M = 44$ а.е.м. принадлежат СО и CO_2 соответственно. Эти газы появляются в составе ОА вакуумной камеры в основном в результате их десорбции с ее стенок. Ионы N_2^+ вносят небольшой вклад в пик с $M = 28$ а.е.м.

На рис. 2, в представлен масс-спектр ОА прогретой вакуумной камеры УВБЛ-6, отсеченной от насосов при отсутствии течи. Основные масс-спектрометрические пики принадлежат молекулярному иону водорода H_2 , оксиду и диоксиду углерода СО и CO_2 . Значительными являются пики инертных газов He и Ar при незначительном количестве водного пара H_2O . Такой состав ОА является результатом как газовой выделения со стенок вакуумной камеры (H_2 , СО и CO_2), так и селективности откачивания насосами составляющих воздуха.

На рис. 2, г представлен масс-спектр ОА вакуумной камеры при давлении в ней $P = 2 \times 10^{-7}$ Па при ее откачивании ОГИН в его основном рабочем режиме ($U_a = 7,5$ кВ, $I_a = 25$ мА, $I_c = 2,6$ А, $U_c = 50$ В, потребляемая мощность в анодной цепи около 200 Вт) при водяном охлаждении его корпуса. Основной составляющей ОА является метан CH_4 с $M = 16$ а.е.м. Его количество и определяет пре-

дельное давление насоса. При работе ОГИН в «сторожевом» режиме ($U_a = 2$ кВ, $I_a = 5$ мА, $I_c = 2,4$ А, потребляемая мощность в анодной цепи около 10 Вт) насос поддерживает разрежение в камере $P = 4 \times 10^{-7}$ Па. Из масс-спектра ОА (рис. 2, д) видим, что основной ее составляющей снова является метан, а также инертный гелий, который при таком режиме работы насоса практически не откачивается.

Наиболее интересным является масс-спектр ОА вакуумной камеры при ее откачивании ОГИН в том же основном рабочем режиме и давлении в ней $P = 2 \times 10^{-8}$ Па (рис. 2, е), но с использованием азотной криопанели. Теперь газом, который определяет предельное разрежение в камере, является водяной пар H_2O , а не метан CH_4 . По нашему мнению, причиной этого является значительное снижение интенсивности протекания химической реакции синтеза метана на поверхности сорбирующей титановой пленки при ее охлаждении до $T = 77$ К по сравнению с $T = 290$ К, так как откачивание метана титановой пленкой и при $T = 77$ К является малоэффективным.

Заключение

По результатам проведенных исследований работы вакуумного орбитронного геттерно-ионного насоса (ОГИН) с азотной криопанелью можно сделать чрезвычайно важный в практическом плане вывод, а именно, поскольку молекулы водяного пара появляются в составе газовой атмосферы вакуумной камеры лишь вследствие десорбции с ее стенок, то

при существенном уменьшении количества десорбируемых молекул водяного пара (в результате тщательного обезгаживания камеры продолжительным нагреванием до 250–300 °С) при использовании ОГИН с азотной криопанелью возможно и дальнейшее улучшение в ней вакуума. Кроме того, отличием масс-спектров ОА вакуумной камеры с «безмасляным» вакуумом (рис. 2, *z–e*) при её откачивании орбитронным насосом и «масляным» вакуумом (рис. 2, *a*), является полное отсутствие в масс-спектрах «безмасляного» вакуума масс-спектрометрических пиков молекул тяжелых углеводородов и их фрагментов.

Таким образом, разработанный нами ОГИН с азотной криопанелью является эффективным откачивающим средством для создания сверхвысокого (лучше 10^{-8} Па) безмасляного вакуума в металлических прогреваемых вакуумных установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Yoshimura N.* Vacuum Technology. Practice for Scientific Instruments. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
2. *Hoffman D., Singh B., Thomas J.* Handbook of vacuum equipment and technology. – Moscow: Technosphere, 2011.
3. Вакуумная техника: справочник: под общ. ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. – М.: Машиностроение, 2009.
4. *Саксаганский Г. Л.* Электрофизические вакуумные насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
5. *Хэфер Р.* Криовакуумная техника. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. *Douglas R. A., Zabritski J., Herb R. G.* // Rev. Sci. Instrum. 1965. Vol. 36. No 1. P. 1.
7. Вакуумная техника: справочник: под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1992.
8. *Львов Б. Г., Ветров В. А.* // Вакуумная техника и технология. 2003. Т. 13. № 3. С. 141.
9. *Grzebyk T., Górecka-Drzazga A.* // Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. Vol. 60. No. 1. 2012. P. 19.
10. *Ануфриев Г. С., Болтенков Б. С., Рябинов А. И.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 1. С. 105.

PACS: 07.75.+h; 32.10.Bi, 33.15.Ta

Study of the work of a getter-ion ultrahigh-vacuum orbitron pump

*V. B. Loboda, V. N. Zhmailov, M. Ya. Dovzhyk, S. N. Khursenko,
and A. V. Chepizhnyi*

Sumy National Agrarian University
160 Gerasim Kondratieva st., Sumy, 40000, Ukraine

Received January 28, 2020

The article presents the results of studies of the operation of a vacuum orbitron getter-ion pump (OGIP) with a nitrogen cryopanel. The design features of the OGIP and its operation modes are described. The MX7304A mass spectrometer was used to study the composition of the residual atmosphere of a metal heated vacuum chamber when it was pumped by OGIP to an ultrahigh vacuum, depending on its operating conditions. It is shown that a feature of the mass spectra of the residual atmosphere is the complete absence of peaks of heavy hydrocarbons in them. The main component of the residual atmosphere (determining the ultimate vacuum of the pump) during water cooling of OGIP is methane CH₄. When using nitrogen cryopanel at a chamber pressure of $P = 2 \times 10^{-8}$ Pa, the main component of the residual atmosphere is H₂O water vapor, and therefore, with careful degassing of the vacuum chamber, the use of an orbitron pump with a nitrogen cryopanel makes it possible to obtain an ultrahigh oil-free vacuum better than 10^{-8} Pa.

Keywords: ultrahigh oil-free vacuum, orbitron vacuum pump, residual atmosphere mass spectrum.

REFERENCES

1. N. Yoshimura, *Vacuum Technology. Practice for Scientific Instruments* (Berlin, Heidelberg, Springer, 2008).
2. D. Hoffman, *Handbook of Vacuum Equipment and Technology*. (Moscow, Technosphere, 2011).
3. K. E. Demihov, *Vacuum Techniques* (Moscow, Mashinostroenie, 2009) [in Russian].
4. G. L. Saksaganskii, *Electrophysical Vacuum Pumps*. (Moscow, Energoatomizdat, 1988) [in Russian].
5. R. Hjefer, *Cryovacuum technology* (Moscow, Energoatomizdat, 1983) [in Russian].
6. R. A. Douglas, Zabritski J., and R. G. Herb, *Rev. Sci. Instrum.* **36**, 1 (1965).
7. E. S. Frolov, *Vacuum Techniques* (Moscow, Mashinostroenie, 1992) [in Russian].
8. B. G. L'vov and V. A. Vetrov, *Vakuumnaya Tekhnika i Tekhnologiya* **13** (3), 141 (2003).
9. T. Grzebyk and A. Górecka-Drzazga, *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences* **60**, 19 (2012).
10. G. S. Anufriev, B. S. Boltenkov, and A. I. Ryabinkov *J. Tech. Phys.* **76** (1), 105 (2006).