

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. Каразіна
Фізико-технічний факультет

**Методичні вказівки до лабораторних робіт
«Фізика та техніка вакууму»**

Харків 2010

ЗМІСТ

Рекомендовано Вченою Радою ФТФ ХНУ
протокол № ____ від _____ 2010 року.

Методичні вказівки до лабораторних робіт «Фізика та
техніка вакууму» / уклад. С. І. Кононенко, В. П. Журенко,
О. В. Калантар'ян — Х. : ХНУ, 2010. — 24 с.

Вступ	4
Лабораторна робота № 1	9
Лабораторна робота № 2	15
Лабораторна робота № 3	22
Література	22



ВСТУП



Послушайте!
Если звезды зажигаются,
Значит это кому-нибудь нужно...
В. Маяковский

Історія вакуумної техніки

У наш час вакуумна техніка набула широкого використання у різних галузях науки та техніки. З'явився зовсім новий термін — вакуумна технологія, тобто технологічні процеси, які проводяться лише у умовах, коли тиск газів не перевищує деякої величини (тобто у вакуумних умовах).

Вакуумна техніка (ВТ) — це наука, яка вивчає фізико-хімічні процеси у розріджених газах; питання отримання, збереження й вимірювання вакууму.

Історія ВТ починається з перших спроб людини отримати деяке розрідження газу. У першому віці до н.е. з'явилися перші насоси, які були спроможні створювати невеличкі розрідження (шприц Герона, водяний насос Ктзєбія). Але роботи по вивченню властивостей вакууму були заборонені церковною владою. Наприклад, у рішенні Парижського Собору під головуванням абату Темпє стверджувалося, що «порожнеча може бути створена тільки могутньою владою божою». До середини XVII сторіччя поняття «вакуум» (слово вакуум у перекладі з латинської мови означає «пустота») використовувалося лише у філософії та теології. Давньогрецький філософ Демокрит вважав, що одним із «початків світу» є порожнеча. Пізніше Аристотель впроваджує поняття ефіру - невідчутного середовища, але спроможного передавати деякі фізичні впливи. Слід зауважити, що у цей час вакуум широко використовували у водопідйомних та пневматичних пристроях, але мабуть, цього на той час було досить.

Науковий етап у розвитку ВТ розпочав видатний вчений Галілео Галілей, який підрахував «силу боязні порожнечі» із факту неможливості підйому води на висоту більшу ніж 10 м незалежно від діаметра труби. У 1643 році учень Галілея Еванджелісто Торичелі відкрив, що атмосфера створює тиск, який дорівнює тиску стовпа ртуті заввишки лише у 760 мм. Простір над ртуттю, по уяві

Торичелі, був «абсолютною порожнечею». Тепер ця порожнеча носить назву «торичелевої». У сьогоднішня ми знаємо, що цей простір, заповнений паром ртуті, яка має при нормальній температурі тиск $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па. Приблизно в цей же час Отто Геріке винайшов перший механічний повітряний насос, та провів знаменитий дослід із Магдебургськими півкулями. Але слід зауважити, що аж до 19 сторіччя практичне використання вакууму обмежувалося лише пристроями для відкачки води з колодязів.

У 19 сторіччі були проведені цілий ряд досліджень, які заклали фізичний фундамент ВТ. Це, наприклад, дослід французького хіміка Жана Батиста Дюма, який досяг пониження тиску у посудині, заповнюючи її водяною паром, яку потім сконденсував охолодженням. Німецький хімік Роберт Вільгельм Бунзен, творець відомого «бунзенівського пальника», здійснив відкачку газу струменем рідини, що швидко витікала. Ці та інші досягнення вчених були впроваджені лише у наукових дослідженнях, бо ще не існувало галузей виробництва, які б потребували використання ВТ.

У спеціальну дисципліну ВТ почала формуватися наприкінці 19 та на початку 20 віків. У цей час винахід першої електричної лампи з вугільним електродом О.М. Лодигінім (1873 р.), відкриття термоелектронної емісії Т.А. Едісоном (1883 р.), відкриття О.Г. Столетовим та Г. Герцем фотоелектричного ефекту не тільки збільшили наші знання у галузі використання розріджених газів, але призвели до стрімкого розвитку вакуумної техніки. На неї з'явилася соціальне замовлення.

У 1884 році італієць А. Малін'яні вперше застосував у виробництві ламп накалювання зв'язування залишкових газів паром фосфору і тим самим поклав початок застосуванню різноманітних поглиначів, так званих гетерів.

У 1904 році Дж. Д'юар розробив спосіб отримання вакууму шляхом поглинання газів активованим вугіллям, який охолоджувався рідким азотом (тепер це сорбційний насос). Через рік Геде сконструював перший обертовий механічний насос. Цей пристрій став великим кроком уперед. Він дозволяв отримувати граничний тиск біля 10^{-2} Па. Далі той же Геде розробив молекулярний (1912 р.) та ртутний дифузійний (1913 р.) насоси.

Паралельно з розробкою вакуумних насосів здійснювалося створення техніки вимірювання низького тиску. Уже у 1874 році Г. МакЛеодом було розроблено компресійний манометр, який суттєво розширював нижню границю вимірювання тиску рідинними манометрами. Далі у 1909 р. М. Пірані було створено тепловий, а у 1916 р. О. Баклі іонізаційний манометри.



Успіхам розвитку ВТ сприяли чисельні теоретичні та експериментальні роботи; особливо слід визначити роботи, які проведені на початку 20 сторіччя американськими вченими І Ленгмюром та С. Дешманом, англійцем Н.Р. Кемпбелом і датським фізиком М. Кнудсеном.

За радянських часів розвиток і становлення ВТ зв'язано з ім'ям академіка С.О. Векшинського (1896–1974), який організував у 1928 році у Ленінграді на електровакуумному заводі «Світлана» вакуумну лабораторію, а потім очолив науково-дослідний інститут у Москві.

Для отримання надвисокого вакууму винаходяться насоси, які працюють на інших фізичних принципах: турбомолекулярний (Беккер, 1958), магніторозрядний (Джеспен і Холанд, 1959).

Далі вдосконалюється техніка вимірювання низького тиску. Для цього почали використовувати аналізатори парціального тиску, за допомогою яких визначали не тільки тиск, а і склад та кількість кожної компоненти залишкового газу. Надвисоковакуумні системи вимагали для забезпечення їх надійного збирання й експлуатації розробки чутливих методів визначення натікань у вакуумних системах. Були розроблені нові методи: мас-спектрометричний, галоїдний та ін. Для знижки газовиділення конструкційних матеріалів було застосовано прогрів усієї вакуумної установки. Вакуумні системи виготовляють суцільнометалевими, розробляють конструкцію надвисоковакуумних ущільнень, вводів руху й електрики до вакууму.

Досягнення криогенної техніки знайшли також застосування у ВТ. Криогенні насоси почали використовувати спочатку у наукових дослідженнях, а потім у виробництві.

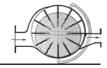
Зауваження

До початку ХХ сторіччя ВТ використовувалася лише у наукових дослідженнях і тому її розвиток був повільним. Прискореніми темпами вона почала розвиватися при появі відповідної потреби в промисловості.

Перший стрибок у своєму розвитку ВТ зробила при виробництві перших масових вакуумних приладів – електричних ламп.

Другий стрибок, пов'язаний з початком ери електровакуумних приладів: електронних ламп, електронно-променевих трубок та ін.

Третій, останній стрибок був обумовлений швидким розвитком мікроелектроніки.



Галузі використання вакуумної техніки

У сьогодення важко знайти таку галузь науки і техніки де не застосовувалися б досягнення вакуумної техніки. Як вже зауважено вище, з кінця минулого сторіччя до наших днів головною сферою застосування ВТ є електронна техніка. В електронно-вакуумних приладах вакуум є конструктивним елементом і обов'язковою умовою функціонування на протязі довгого часу. Низький і середній вакуум використовується у освітлювальних приладах і газорозрядних приладах. Високий вакуум — у приймально-підсилюючих та генераторних лампах. Найбільш високі вимоги до вакууму пред'являються при виробництві електронно-променевих трубок та надвисокочастотних приладів. Для роботи напівпровідникових приладів наявність вакууму не потрібна, але в процесі їх виготовлення широко застосовується ВТ. Особливо широко ВТ застосовується при виготовленні мікросхем, де процеси нанесення тонких плівок, іонного травлення, електронної літографії забезпечують отримання елементів електронних схем субмікронного розміру.

В енергетиці застосування ВТ, перш за все, пов'язано з проблемою керованого термоядерного синтезу, бо усі теперішні проекти таких реакторів передбачають наявність вакуумної камери.

Дуже багато прикладів застосування вакуумної техніки у металургії, а саме у отриманні надчистих матеріалів. Виплавляння металів у вакуумних умовах звільняє їх від газів, які розчинені у них. Завдяки цьому метали набувають високої механічної міцності, пластичності та в'язкості. Плавленням у вакуумі отримують безвуглецеві сорти сталі для електродвигунів, високо електропровідну мідь, магній, кальцій, тантал, платину, титан, цирконій, берилій, рідкісні метали та їх сплави. Спікання у вакуумі порошоків тугоплавких металів, таких як вольфрам і молібден, є одним з основних процесів у порошковій металургії. Надчисті речовини, напівпровідники, діелектрики виготовляються у вакуумних кристалізаційних установках. Штучні кристали алмазів, рубінів, сапфірів отримують із застосуванням ВТ. Дифузійна зварювання у вакуумі дозволяє створити нероз'ємні герметичні з'єднання матеріалів із дуже різними температурами плавлення. Таким чином з'єднують кераміку з металом, сталь з алюмінієм та інше. Високоякісне з'єднання матеріалів з однорідними властивостями забезпечує променева зварювання у вакуумі.

У хімічній промисловості використовують вакуумні сушильні апарати при виготовленні синтетичних волокон, поліамідів, амінопластів, поліетилену, органічних розчинників. Вакуум-фільтри



використовуються при виробництві целюлози, паперу, мастил. У виробництві фарб і мінеральних добрив використовують вакуумні кристалізаційні апарати.

У фармацевтичній і харчовій промисловості дуже широко використовується ВТ. Вакуумні кристалізаційні та дистиляційні установки використовуються для виробництва цукру, синтетичних гормонів, вітамінів, лікувальних сироваток і отримання багатьох цінних продуктів. Консервування харчових продуктів з збереженням їх смакових і поживних властивостей уже давно є сферою застосування ВТ. Отримання анатомічних і бактеріологічних препаратів здійснюється також у вакуумних умовах.

У теперішній час з'явився новий термін — вакуумові та вакуумно-плазмові технології. Звісна річ, використання цих технологій стає неможливою без використання ВТ. Спектр використання їх дуже широкий: від легкої промисловості, де за їх допомогою створюються різноманітні покриття, як функціональні так і декоративні, до оптичної промисловості при виготовленні дзеркал, фільтрів, лінз тощо.

Дуже велику роль відіграє ВТ у наукових дослідженнях. Без неї стає неможливою розвиток ядерної фізики, фізики плазми, матеріалознавства та інших галузей сучасної науки. З отриманням надвисокого вакууму в камерах імітації стало можливим вивчення різних аспектів поведінки космічних апаратів у земних умовах.

В підсумку слід сказати, що від подальшого розвитку вакуумної техніки дуже залежить успіх при вивченні нових явищ, розробка нових приладів та технологій, створення матеріалів із новими властивостями.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТОКА РАЗРЯДА МАГНИТОРАЗРЯДНОГО НАСОСА НМД-0.4-1 ОТ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы — изучение принципа действия и конструктивных особенностей магнитных электроразрядных насосов и приобретение практических навыков работы с насосом магниторазрядным диодным типа НМД-0.4-1.

Магнитные электроразрядные насосы, которые часто называют *магниторазрядными*, являются ионно-сорбционными насосами. Они используют разряд в магнитном поле, как для распыления гетера, так и для ионизации остаточных газов. Вследствие этого в магниторазрядных насосах устранен такой недостаток, присущий испарительным насосам, как наличие элементов с высокой температурой.

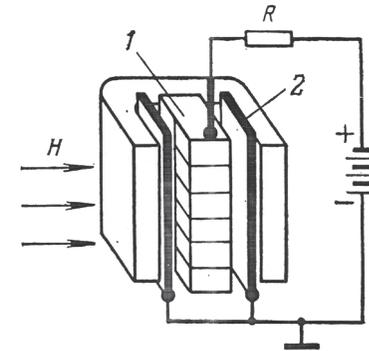


Рис. 1. Схема диодного магнито-разрядного насоса:

1 — анод; 2 — два элемента катода из титана.

Простейший диодный магниторазрядный насос состоит из анода и катода (см. рис.1). Анод изготавливается из нержавеющей стали и состоит из отдельных разрядных ячеек, с открытых концов которых расположены общие катоды из активного материала (титана). Эта система электродов помещается в магнитное поле, перпендикулярное плоскости катодов. При подаче на электроды разности потенциалов в несколько киловольт в ячейках возникает газовый разряд, поддерживающийся в широком диапазоне давлений. Положительные



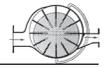
ионы газов, образующиеся в разряде при соударении молекул с электронами, ускоряются электрическим полем в направлении катодов. При бомбардировке поверхности катодов происходит процесс распыления его материала. Распыленный с катодов титан осаждается на все внутренние поверхности электродов и корпуса насоса. Однако, следует заметить, что непрерывно возобновляемая пленка титана образуется главным образом на аноде. Большая часть поверхности катодов, подвергаясь интенсивной бомбардировке, интенсивно распыляется и, как следствие, происходит постоянная убыль материала. Активные газы (N_2 , O_2), присутствующие в вакуумной системе, попадая на свеженапыленную на аноды пленку титана, связываются на ней, образуя устойчивые химические соединения.

Образующиеся при реакциях устойчивые соединения — нитриды или окислы титана — могут возникать и на катоде в момент попадания туда ионов или молекул этих газов. Однако, из-за сильного распыления материала катода активные газы, в конце концов, оказываются в основном на аноде, оставаясь лишь на тех периферийных участках катода, которые почти не подвергаются ионной бомбардировке.

Сложные газы, пары воды, углекислый газ, аммиак, углеводороды диссоциируют в разряде. Ионы осколков молекул также вызывают распыление материала катода. Ионы легких газов (водород, дейтерий, гелий) не вызывают заметного распыления материала катода, так что для них более существенным является второй механизм откачки: ионы легких газов, имеющих малые размеры, могут внедряться в материал катода и диффундировать в него.

Первоначально высокая быстрота действия насоса по этим газам постепенно уменьшается, особенно для гелия, не образующего (в отличие от водорода) с титаном твердых растворов. При бомбардировке материала катода ионами тяжелых газов или при нагреве его разрядом до температуры свыше 200°C наблюдается обратное выделение легких газов; однако при комнатной температуре элементов оно незаметно даже при давлениях 10^{-8} Па (10^{-10} мм рт. ст.).

Тяжелые инертные газы — аргон, криптон и ксенон — откачиваются благодаря их адсорбции катодом. Вследствие больших молекулярных размеров диффузия этих газов в катод затруднена, и первоначально высокая быстрота действия насоса по этим газам резко уменьшается. Поглощение этих газов происходит в основном на периферийных участках ячеек, куда напыляется титан, интенсивно распыляемый тяжелыми ионами из центральных частей ячеек катода. При откачке аргона с давлением около 10^{-3} Па ($\sim 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) и даже при очень длительной откачке воздуха с давлением $\geq 10^{-3}$ Па



(10^{-5} мм рт. ст.), содержащего 1% аргона, наблюдаются резкие периодические всплески давления, называемые аргоновой нестабильностью. По-видимому, это происходит из-за периодически возникающей нестабильности разряда, которая приводит к превышению скорости распыления над скоростью напыления титана в тех местах, где при обычных условиях происходит стабильное напыление титана. Тем не менее, присутствие аргона, интенсивно распыляющего катод, часто оказывается полезным, так как улучшает откачку других газов. По этой же причине в процессе эксплуатации насосы иногда подвергают аргоновой обработке для улучшения характеристик.

Чем больше давление в насосе, тем больше ионов поступает на катод (увеличивается ионный ток) и тем больше будет распыление катодов; при понижении давления ионный ток и распыление катодов уменьшается. Таким образом, важной особенностью магниторазрядных насосов является своеобразная авторегулировка скорости распыления катодов, обеспечивающая экономное их расходование и большой срок службы насоса. Поскольку ионный ток приблизительно пропорционален давлению, он часто используется для оценки величины давления в насосе и откачиваемом объеме.

Простота устройства и возможность работы в любом положении также выгодно отличают магниторазрядные насосы от других.

Характер газового разряда в магниторазрядном насосе изменяется с изменением давления. При давлениях $> 10^{-1}$ Па (10^{-3} мм рт. ст.) ток разряда велик вследствие большой электропроводности промежутка. Для того, чтобы разряд при этом не перешел в дуговой, ток его разряда специально ограничивается (в малых насосах используется балластное сопротивление; в крупных насосах используется более сложные электрические цепи), что приводит к уменьшению падения напряжения на разрядном промежутке. При этом уменьшается энергия ионов и, следовательно, резко снижается скорость распыления материала катодов. Поэтому быстрота действия насоса при высоких давлениях невелика, а относительно большая величина тока вызывает разогрев электродов и сильное газовыделение, вследствие чего давление в системе повышается. В этих условиях целесообразно продолжать откачку насосом предварительного разряда до начала периода старта, когда эффект откачки магниторазрядным насосом становится заметным.

В период старта, который может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов в зависимости от состояния и предыстории насоса, давление понижается от 1 до 10^{-2} Па (от 10^{-2} до 10^{-4} мм рт. ст.) и разряд принимает форму, характерную для высоковакуума. Сопротивление разрядного промежутка увеличивается,



ток уменьшается, и происходит рост анодного напряжения, что ведет к увеличению быстроты действия насоса. Период старта завершается относительно быстрым переходом в область высокого вакуума, ток продолжает уменьшаться пропорционально давлению, анодное напряжение и быстрота действия насоса достигают номинальных значений.

В промышленном оформлении электроразрядные насосы изготавливаются различных размеров с быстротой действия от нескольких литров до многих десятков тысяч литров за секунду (по воздуху). Предельный вакуум для насосов данного типа достигает 10^{-10} мм рт. ст. и ниже.

В отечественных электроразрядных насосах типа НЭМ (насос электроразрядный магнитный) высокое положительное напряжение (~7кВ) подается на анодный блок, а катоды заземлены. Эти насосы не могут длительно работать при давлениях $\geq 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. из-за перегрева анода.

В насосах типа НОРД (насос охлаждаемый разрядный диодный) применяется водяное охлаждение анодного блока, поэтому у них анод заземлен, а высокое отрицательное напряжение подается на катоды, изолированные от корпуса.

Основной недостаток диодных электроразрядных насосов — малая быстрота действия по инертным газам. Этот недостаток частично устраняется в триодном насосе.

Поскольку состояние внутренних поверхностей магниторазрядного насоса оказывает решающее влияние на его работоспособность, необходимо предотвращать попадание в насос веществ, которые могут вызывать загрязнение рабочих поверхностей. Совершенно недопустима предварительная откачка системы насосами с масляным уплотнением и не защищенными надежной ловушкой, что приводит к загрязнению разрядных поверхностей углеводородами.

ХОД РАБОТЫ:

Лабораторная работа проводится на экспериментальной вакуумной установке, схема которой представлена на рисунке 2.

Рабочий откачиваемый объем 6 представляет собой герметичную цилиндрическую камеру (см. рис.2). Предварительная форвакуумная откачка камеры осуществляется пластинчато-роторным насосом 1 типа 2НВР-5ДМ. Процесс откачки в пластинчато-роторных насосах основан на механическом всасывании и выталкивании газа вследствие периодического изменения объема рабочей камеры насоса, образуемой цилиндром и движущимися частями



насоса — ротором и пластинами. В процессе откачки зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса — маслом, которое одновременно обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса. А поскольку магниторазрядный насос снижает свою работоспособность при откачке углеводородов (уменьшается быстрота действия и увеличивается предельное остаточное давление), то для предотвращения проникновения паров рабочей жидкости (масла) форвакуумного насоса 1 в откачиваемый объем 6 и магниторазрядный насос 10 применяется азотная форвакуумная ловушка 3. Принцип действия форвакуумной ловушки основан на конденсации паров масла и продуктов его разложения на поверхностях ловушки, охлажденных до низких температур жидким азотом. Давление в рабочей камере измеряется термопарной и ионизационной лампами 7 и 8 с помощью вакуумметра ионизационно-термопарного типа ВИТ-3.

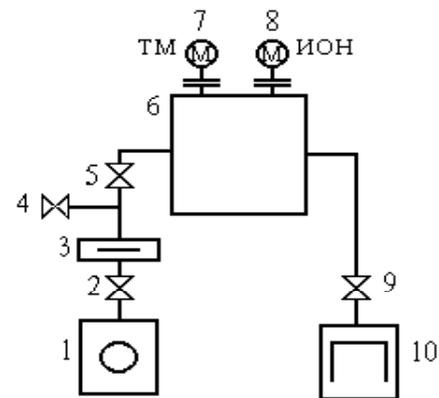


Рис. 2. Схема вакуумной установки лабораторной работы №1: 1 — форвакуумный насос типа 2НВР-5ДМ; 2, 4, 5 — вентили; 3 — азотная ловушка; 6 — откачиваемый объем; 7, 8 — термопарная и ионизационная лампы вакуумметра ВИТ-3; 9 — высоковакуумный клапан; 10 — магниторазрядный насос типа НМД-0.4-1

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить форвакуумный насос 1 (положение «ВКЛ» автомата «ФОРНАСОС» на лабораторном щите ЛЦ-2).
2. Залить азот в азотную ловушку, **соблюдая правила техники безопасности**. Открыть вентиль 2.



3. Включить автомат «РОЗЕТКИ 220 В» на лабораторном щите ЛЩ-2, затем включить термодинамическую часть ВИТ-3.
4. Убедившись в том, что азотная ловушка полностью выморозена (появление инея на заливном патрубке ловушки), открыть вентиль 5 для откачки камеры 6 на форвакуум.
5. Перед включением магниторазрядного насоса убедиться, что переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» блока питания БП-140 находится в положении «0...10 кВ». Включить магниторазрядный насос. Для этого необходимо включить автомат «МАГНИТОРАЗРЯДНЫЙ НАСОС» на лабораторном щите ЛЩ-2. Включить блок питания БП-140 магниторазрядного насоса (кнопка «СЕТЬ»). Убедиться в том, что магниторазрядный насос вышел на нормальный режим работы (закончился период старта и произошел переход в область высокого вакуума, о чем сигнализирует лампочка «ВАКУУМ РАБОЧИЙ»).
6. После того, как в камере будет достигнут предварительный вакуум $< 1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. ($7 \div 8$ мВ), необходимо:
 - 1) закрыть клапан 5;
 - 2) на блоке питания БП-140 магниторазрядного насоса переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» установить в положение «200 мА»;
 - 3) плавно открывая клапан 9, осуществить ступенчатую откачку камеры до давления порядка 10^{-5} мм рт. ст. (ток разряда около 40 мА при полностью открытом клапане). В процессе откачки ток разряда не должен превышать 100 мА с целью продления ресурса работы насоса.
7. Включить ионизационную часть ВИТ-3.
8. Установить переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» блока питания БП-140 на необходимый предел измерения тока разряда.
9. Снять зависимость тока разряда насоса от давления в камере.
10. После окончания измерений произвести отключение установки в следующем порядке:
 - 1) отключить ВИТ-3;
 - 2) перекрыть клапан 9;
 - 3) переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ» блока питания БП-140 перевести в положение «0...10 кВ» и выключить блок питания БП-140 (кнопка «ВЫКЛ»);
 - 4) перекрыть клапан 2;
 - 5) на лабораторном щите ЛЩ-2 выключить следующие автоматы «ФОРНАСОС», «МАГНИТОРАЗРЯДНЫЙ НАСОС», «РОЗЕТКИ 220 В».

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРЕДЕЛЬНОГО ОСТАТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ, ДОСТИГАЕМОГО ПАРОМАСЛЯНЫМ НАСОСОМ ОТ МОЩНОСТИ ЕГО НАГРЕВАТЕЛЯ

Цель работы — изучение принципа действия и конструктивных особенностей диффузионных насосов и приобретение практических навыков работы с паромасляным насосом типа Н-1С-2.

Диффузионные насосы применяются для откачки различных вакуумных систем до остаточных давлений 10^{-1} – 10^{-5} Па и ниже. При таких давлениях длина свободного пути молекул откачиваемого газа практически всегда больше диаметра впускного отверстия насоса и поэтому в нем всегда возникает молекулярный режим течения газа. Молекулы газа при тепловом движении через впускное отверстие насоса направляются к паровой струе. Механизм увлечения газа в диффузионных насосах обусловлен диффузионными процессами. Вследствие разности концентраций газа над паровой струей и в самой струе (концентрация газа в струе вблизи сопла пренебрежимо мала) происходит диффузия газа в струю. Попав в струю, молекулы газа получают импульсы от молекул пара в направлении парового потока и уносятся вместе с паром к стенке корпуса насоса, где пар конденсируется на охлаждаемой стенке, а газ, сжатый в струе до выпускного давления ступени, перетекает вдоль стенки в пространство над следующей ступенью насоса.

Наряду с прямой диффузией газа всегда существует и обратная диффузия в струю со стороны форвакуума. Однако в этом случае молекулы газа, движущиеся в обратном направлении, сталкиваются с движущимися им навстречу молекулами пара и оттесняются обратно; лишь небольшая часть молекул может продиффундировать через струю в обратном направлении. Число молекул газа, диффундирующих через струю в обратном направлении при оптимальном режиме работы насоса, несоизмеримо мало по сравнению с числом молекул газа, диффундирующих в струю со стороны впускного отверстия насоса. Однако в некоторых случаях, например, при откачке легких газов насосом, режим работы которого выбран оптимальным для откачки воздуха, влияние обратной диффузии может заметно сказываться на характеристиках насоса.

Диффузионные насосы подобно бустерным являются многоступенчатыми системами с соплами обращенного зонтичного типа (см. рис.3).



В зависимости от рода рабочей жидкости, используемой в насосе, современные диффузионные насосы подразделяются на паромасляные и парортутные. В паромасляных насосах используют различные рабочие жидкости органического происхождения с низким давлением пара при нормальной температуре. Как правило, эти жидкости представляют собой смесь фракций с различным давлением пара и различной молярной массой.

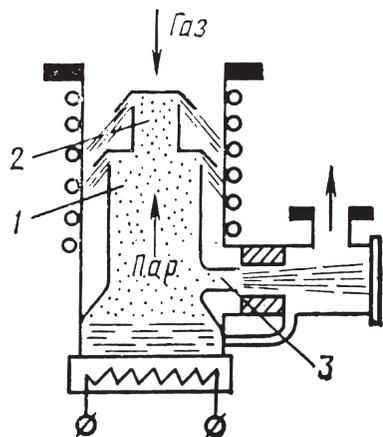


Рис. 3. Схема многоступенчатого диффузионного насоса: 1 — первая ступень; 2 — вторая ступень; 3 — выпускное отверстие насоса

В связи с этим следует отметить, что требования к рабочей жидкости паромасляных насосов, обеспечивающие наиболее благоприятные условия работы отдельных ступеней различны. Так, для работы первой (входной) ступени, определяющей предельное остаточное давление и быстроту действия насоса, нужна рабочая жидкость с низким давлением пара при нормальной температуре (для получения низкого остаточного давления) и при рабочей температуре в кипятильнике (в связи с необходимостью создания паровой струи малой плотности для обеспечения большой скорости диффузии газа в струю). Для последней (выходной) ступени, определяющей наибольшее выпускное давление насоса, давление пара при нормальной температуре несущественно, давление пара при рабочей температуре кипятильника должно быть возможно большим для получения струи высокой плотности. С учетом этого в конструкциях современных паромасляных диффузионных насосов предусматривают



осуществление фракционирования (разделения на фракции) рабочей жидкости в самом насосе (см. рис. 4). При этом тяжелые фракции с малым давлением пара направляются к первой ступени, а легкие фракции с большим давлением пара — к последней ступени. Такие насосы называют фракционирующими.

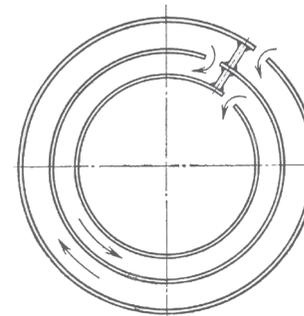


Рис. 4. Путь рабочей жидкости в многоступенчатом диффузионном насосе, обеспечивающий фракционирование

Основными конструкционными материалами паромасляных насосов являются алюминий (детали паропровода, сопла) и низкоуглеродистая или коррозионно-стойкая сталь (корпус).

Парортутные насосы конструктивно отличаются от паромасляных насосов, что обусловлено свойствами ртути как рабочей жидкости. Во-первых, ртуть является однородной жидкостью, не изменяющей состава в кипятильнике насоса; поэтому в парортутных насосах отсутствуют фракционирующие устройства и все ступени насоса питаются паром одного состава. Во-вторых, ртуть химически активна, что обуславливает выбор конструкционных материалов насоса. Парортутные насосы обычно изготавливают из стекла или коррозионно-стойкой стали.

Предельное остаточное давление насоса определяется противодиффузией газа со стороны форвакуума, давлением пара рабочей жидкости при температуре стенок насоса, выносом газов со струей пара из кипятильника, а также газовыделением стенок насоса.

Противодиффузия газа через струю зависит от давления газа под струей, плотности и скорости паровой струи, молярной массы газа.

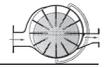
Влияние противодиффузии газа из области форвакуума тем меньше, чем меньше перепад давлений над струей и под ней. В связи с этим оптимальные предельные остаточные давления получают



при работе с многоступенчатыми насосами. При оптимальной для данного газа мощности подогрева многоступенчатого (трех- и четырехступенчатого) насоса противодиффузия в общем случае не является решающим фактором в определении предельного остаточного давления. Только при откачке легких газов и мощности подогрева, оптимальной для откачки воздуха, противодиффузия может быть столь большой, что малейшее изменение выпускного давления приведет к изменению предельного остаточного давления насоса.

Давление пара рабочей жидкости насосов (за исключением ртути) обычно на несколько порядков ниже, чем реальное предельное остаточное давление, поэтому оно не влияет на предельное остаточное давление. Однако при увеличении температуры стенки насоса это влияние может оказаться существенным. Так, при увеличении температуры воды, охлаждающей насос, от 293 до 323 К предельное остаточное давление при работе на масле ВМ-1 повышается в несколько раз, а в насосе с воздушным охлаждением при таком же увеличении температуры охлаждающего воздуха предельное остаточное давление возрастает на два порядка.

Важное значение имеет также вынос газа со струей из кипятильника. Этот процесс обусловлен двумя факторами. Во-первых, при конденсации паровой струи на стенках насоса происходит частичное растворение откачиваемого газа в конденсате, причем, попав вместе с конденсатом в кипятильник, газ увлекается с паром к соплу и выделяется из струи в откачиваемый объем. Во-вторых, некоторые рабочие жидкости, нагреваясь до рабочей температуры в кипятильнике, могут частично разлагаться с выделением газообразных продуктов (так называемый термический крекинг масла), которые выносятся со струей в откачиваемый объем. Естественно, что термическое разложение рабочей жидкости происходит тем интенсивнее, чем выше температура пара в кипятильнике и, соответственно, чем выше подводимая к насосу мощность. Следовательно, кривая зависимости предельного остаточного давления от мощности подогрева должна иметь минимум. С увеличением мощности подогрева предельное остаточное давление сначала уменьшается вследствие уменьшения противодиффузии, а затем, достигнув минимального значения при некоторой мощности подогрева, начинает возрастать вследствие выделения газообразных продуктов термического разложения масла. Выделение из струи газов, попадающих с конденсатом в кипятильник, существенно зависит от растворимости газов в конденсате, температуры конденсата и давления, при котором происходит растворение газа в конденсате. Чем ниже давление, при котором газ контактирует с пленкой конденсата и выше температура



конденсата, тем меньше растворимость газа в конденсате, а соответственно меньше эмиссия газов из струи и ниже предельное остаточное давление насоса.

ХОД РАБОТЫ:

Лабораторная работа № 2 проводится на экспериментальной вакуумной установке, схема которой представлена на рис. 5.

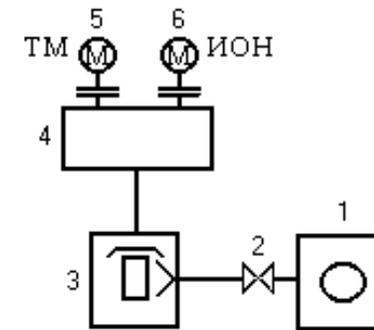


Рис. 5. Схема вакуумной установки лабораторной работы №2: 1 — пластинчато-роторный насос типа НВР-1,25ДУХЛ4; 2 — вакуумный зажим; 3 — высоковакуумный насос типа Н-1С-2; 4 — вакуумный объем; 5, 6 — термопарная и ионизационная лампы вакуумметра.

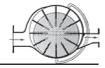
Откачка рабочего вакуумного объема 4 осуществляется высоковакуумным насосом 3 типа Н-1С-2, который предназначен для откачки воздуха и других газов, не воздействующих на материалы конструкции и на рабочую жидкость (масло) насоса. Насосы такого типа работают только в случае предварительного разрежения всей вакуумной системы, включая и сам насос. Предварительная форвакуумная откачка осуществляется пластинчато-роторным насосом 1 типа НВР-1,25ДУХЛ4. Процесс откачки в пластинчато-роторных насосах основан на механическом всасывании и выталкивании газа вследствие периодического изменения объема рабочей камеры насоса, образуемой цилиндром и движущимися частями насоса — ротором и пластинами. В процессе откачки зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса — маслом, которое одновременно обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса. Давление в вакуумной системе измеряется при помощи термопарной 5



и ионизационной 6 ламп вакуумметра РВЭ–4.3 или ионизационно-термопарного типа ВИТ–3. Исследование зависимости предельного остаточного давления, достигаемого паромасляным насосом данного типа, от мощности его нагревателя P осуществляется путем изменения напряжения U , прикладываемого к нагревателю. Напряжение нагревателя можно изменять при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа). Мощность электронагревателя рассчитывается по показаниям электростатического вольтметра, установленного в его электрической цепи: $P = U^2/R$, где R — сопротивление нагревателя равно 100 Ом. Кнопки включения и выключения диффузионного насоса 3, форвакуумного насоса 1 и ручка регулировки напряжения ЛАТРа расположены на лабораторный стенд.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить автомат «ЛАБ №2» на лабораторном щите ЛЩ–3.
2. Включить форвакуумный насос предварительного разряжения 1 (положение «ВКЛ» переключателя «ФН»).
3. Открыть вакуумный зажим 2 для откачки рабочей камеры и дифф.насоса на форвакуум.
4. Включить термопарную часть вакуумметра.
5. Пустить охлаждающую воду, открыв вентиль системы подачи воды.
6. Откачав систему до давления порядка 1,2 мВ ($1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.), включить электронагреватель диффузионного насоса (положение «ВКЛ» переключателя «ДН»). Установить с помощью ЛАТРа напряжение нагревателя 220 В (напряжение нагревателя измеряется электростатическим вольтметром). Диффузионный насос выходит на рабочий режим в течение 25–30 мин. после включения электронагревателя.
7. Включить ионизационную часть ВИТ–3 или дождаться выхода на режим измерения ионизационной части вакуумметра РВЭ–4.3.
8. Снять зависимость предельного остаточного давления, достигаемого паромасляным насосом, от мощности его нагревателя в следующем порядке:
 - 1) Установить необходимое значение напряжения, прикладываемого к нагревателю, ручкой регулировки напряжения ЛАТРа (диапазон изменения напряжения 200–240 В, шаг — 10 В).
 - 2) Через 15 минут снять показания предельного остаточного давления. На основании показаний вольтметра определить мощность нагревателя.



- 3) Прodelать пункты 8.1–8.2 для всех значений напряжения нагревателя (200 В, 210 В, 220 В, 230 В, 240 В).
9. Произвести выключение установки в следующем порядке:
- 1) Отключить ионизационную часть ВИТ–3. Снять напряжение с электронагревателя (установить с помощью ЛАТРа напряжение нагревателя 0 В), отключить электронагреватель (положение «ВЫКЛ» переключателя «ДН»).
 - 2) По истечении 45 минут, необходимых для охлаждения диффузионного насоса, выключить вакуумметр, закрыть вакуумный зажим 2, перекрыть вентиль в системе подачи воды и выключить форвакуумный насос (положение «ВЫКЛ» переключателя «ФН»).
 - 3) Выключить автомат «ЛАБ №2» на лабораторном щите ЛЩ–3.

По измеренным значениям мощности нагревателя и предельного остаточного давления построить исследуемую зависимость и определить оптимальное значение мощности нагревателя.



ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ БЫСТРОТЫ ОТКАЧКИ ОБЪЕМА ОТ ПРОВОДИМОСТИ ВАКУУМНОГО ТРУБОПРОВОДА

Цель работы — ознакомление с теоретическими основами процесса откачки и экспериментальное исследование зависимости быстроты откачки объема от проводимости вакуумного трубопровода.

Основные понятия

Поток газа — расход газа, в котором количество газа выражено произведением давления на объем:

$$Q = S \cdot p, \quad (1)$$

где $S = (dV/dt)_p$ — быстрота откачки, или объем газа при данном давлении, откачиваемый в единицу времени, м³/с; p — давление в рассматриваемом сечении, Па. Единица потока газа — Па·м³/с.

Быстрота действия вакуумного насоса S — быстрота откачки, получаемая во входном сечении насоса при его работе:

$$S = Q / p, \quad (2)$$

Быстроты откачки объема S_0 — объем газа при данном давлении, откачиваемый в единицу времени через сечение вакуумного трубопровода, соединяющего объем с насосом:

$$S_0 = Q / p_0, \quad (3)$$

Проводимость элемента вакуумной системы — отношение потока газа Q , проходящего через элемент вакуумной системы, к разности давлений ($p_1 - p_2$) на его концах:

$$U = Q / (p_1 - p_2) \quad (4)$$

Единица проводимости — м³/с.

Величину W , обратную проводимости элемента вакуумной системы, называют *сопротивлением*:

$$W = 1 / U = (p_1 - p_2) / Q \quad (5)$$

Проводимость сложных вакуумных систем, состоящих из отдельных элементов, определяют аналогично сопротивлению электрических цепей: при последовательном соединении n элементов вакуумной системы с известной проводимостью U_i (сопротивлением W_i) проводимость системы U определяется по формуле:

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i} \quad (6)$$

(общее сопротивление $W = \sum_{i=1}^n W_i$).

При параллельном соединении n элементов вакуумной системы ее общая проводимость U равна сумме проводимостей всех элементов:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (7)$$

(общее сопротивление определяется из соотношения $\frac{1}{W} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{W_i}$).

Основное уравнение вакуумной техники

Быстроту откачки объекта S_0 объемом V_0 при давлении p_0 определяют по быстроте действия насоса S и проводимости трубопровода U при условии постоянства потока газа $Q = \text{const}$.

Из условия $Q = S_0 \cdot p_0 = U \cdot (p_0 - p) = S \cdot p = \text{const}$ следует

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S}, \quad (8)$$

или

$$S_0 = \frac{U \cdot S}{(U + S)}. \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой *основное уравнение вакуумной техники*, которое выражает отличие быстроты откачки объема S_0 от быстроты действия насоса S при наличии трубопровода проводимостью U . При $U \gg S$ влияние трубопровода незначительно и $S_0 \sim S$; при $U \ll S$ быстрота откачки объекта определяется проводимостью трубопровода, т.е. $S_0 \sim U$. В общем случае $S > S_0$ и $U > S_0$.

Режимы течения газов

Течение газа в вакуумных системах зависит от ряда параметров: температуры газа и стенок, разности давлений на концах системы, абсолютного значения давления, внутреннего трения в газе и взаимодействия газа с поверхностью, а также от формы и размеров рассматриваемой системы. Различают три основных вида газа: турбулентное или вихревое, ламинарное или вязкостное и молекулярное



или свободно-молекулярное. Четкой границы между этими видами течения нет — существуют промежуточные области переходных течений.

В вакуумной технике обычно выделяют вязкостный (вплоть до атмосферного давления в системе), молекулярный и переходный между вязкостным и молекулярным режимы течения.

При вязкостном режиме течения газа средняя длина свободного пути частиц λ значительно меньше характерного размера емкости (для круглого трубопровода, например, таким размером является его диаметр D). В области молекулярного течения газа и переходной области между вязкостным и молекулярным режимами средняя длина свободного пути частиц больше характерного размера или сравнима с ним.

Критерием режимов течения служит некая характерная величина, которая называется числом Кнудсена $K_n = \lambda / D$. Так в расчетах проводимости цилиндрических круглых трубопроводов принимают, что молекулярный режим течения наступает при $K_n > 0,33$, вязкостный — при $K_n < 10^{-2}$; переходному режиму соответствует $10^{-2} < K_n < 0,33$.

Проводимость вакуумного трубопровода круглого сечения

Проводимость определяется в зависимости от режима течения газа по трубопроводу.

Вязкостный режим течения газа:

Для воздуха при 20°С

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (10a)$$

где d и l — в м; p_1 и p_2 — в Па; или

$$U_B = 182 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \text{ л/с}, \quad (10б)$$

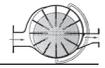
где d и l — в см; p_1 и p_2 — в мм рт. ст.

Уравнения (10a) и (10б) применимы только для длинных трубопроводов и действительны при значениях $l/d > 100$.

Молекулярно-вязкостный режим течения газа:

Для воздуха при 20°С

$$U_{M-B} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2} + 121 \frac{d^3}{l} \frac{1 + 193d \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 238d \frac{p_1 + p_2}{2}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (11a)$$



и, если p_1 и p_2 в мм рт. ст. и d и l — в см,

$$U_{M-B} = 182 \frac{d^4}{l} \frac{p_1 + p_2}{2} + 12,1 \frac{d^3}{l} \frac{1 + 256d \frac{p_1 + p_2}{2}}{1 + 316d \frac{p_1 + p_2}{2}}, \text{ л/с}. \quad (11б)$$

Молекулярный режим течения газа:

Для воздуха при 20°С

$$U_M = 121 \frac{d^3}{l}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (12a)$$

или при d и l в см

$$U_M = 12,1 \frac{d^3}{l}, \text{ л/с}. \quad (12б)$$

ХОД РАБОТЫ:

В данной лабораторной работе исследуется зависимость быстроты откачки вакуумной камеры от проводимости вакуумного трубопровода. Рабочий откачиваемый объем представляет собой герметичную цилиндрическую камеру (объем камеры $V=28,9$ л). Откачка камеры осуществляется пластинчато-роторным насосом типа 2НВР-5Д (быстрота действия насоса S при входных давлениях 760...1 мм рт.ст. составляет не менее 5 л/с). Процесс откачки в пластинчато-роторных насосах основан на механическом всасывании и выталкивании газа вследствие периодического изменения объема рабочей камеры насоса, образуемой цилиндром и движущимися частями насоса — ротором и пластинами. В процессе откачки зазоры в роторном механизме уплотняются рабочей жидкостью насоса — маслом, которое одновременно обеспечивает смазку и частичное охлаждение механизма насоса. Рабочий объем соединен с насосом вакуумопроводом, который оказывает сопротивление потоку газа, подобно сопротивлению проводника электрическому току. В работе предлагается исследовать проводимость для четырех вакуумопроводов, представляющих собой латунные трубки разного диаметра ($d_1=9$ мм $d_2=16$ мм, $d_3=26$ мм, $d_4=34$ мм) и одинаковой длины ($l=71,5$ см). Давление в рабочей камере измеряется вакуумметром ионизационно-термопарным типа ВИТ-3.

Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить автомат «ЛАБ №3» на лабораторном щите ЛЩ-3.
2. Присоединить вакуумную лампу типа ПМТ-4М к входному патрубку насоса 2НВР-5Д при помощи быстроразъемного



соединения с накидным хомутом. Подключить ВИТ-3 к лампе ПМТ-4М.

3. Включить ВИТ-3 (термопарную часть).
4. Включить форвакуумный насос 2НВР-5Д (положение «ВКЛ» переключателя «ФН» на лабораторном стенде).
5. Открыть вакуумный зажим типа «ласточкин хвост», используемый для разобщения форнасоса и вакуумпровода. По истечении $t=20$ минут снять показание впускного давления насоса p_2 .
6. Закрыть зажим типа «ласточкин хвост». Отключить ВИТ-3 и отсоединить лампу ПМТ-4М от входного патрубка насоса.
7. Подключить вакуумметр к лампе ПМТ-2 для измерения давления в камере.
8. Присоединить исследуемый вакуумпровод к насосу и вакуумной камере с помощью быстроразъемных соединений с накидными хомутами.
9. Открыть зажим типа «ласточкин хвост». По истечении $t=20$ минут снять показание давления p_1 в откачиваемой камере.
10. Закрыть зажим типа «ласточкин хвост», отсоединить вакуумпровод.
11. Повторить пункты 8–10 для других исследуемых вакуумпроводов.
12. Произвести выключение установки в следующем порядке:
 - 1) Отключить ВИТ-3.
 - 2) Закрыть вакуумный зажим типа «ласточкин хвост» и выключить форвакуумный насос (положение «ВЫКЛ» переключателя «ФН»).
 - 3) Выключить автомат «ЛАБ №3» на лабораторном щите ЛЩ-3.

Используя измеренные значения впускного давления насоса p_2 и давления p_1 в откачиваемой камере, рассчитать проводимости исследуемых вакуумпроводов U по формуле (10а) или (10б) для трубопроводов круглого сечения (предполагается, что режим течения газа — вязкостный). Исходя из основного уравнения вакуумной техники (9) рассчитать быстроту откачки объема S_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Б. И., Куцнецов В. И., Пипко А. И., Плисковский В. Я. Основы вакуумной техники. — М., 1975.
2. «Вакуумная техника», справочник под ред. Фролова Е. С. и Минайчева В. Е., — М., 1985.
3. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники, — К.:Вища школа, 1981.
4. Розанов Л. Н. Вакуумная техника, — М.: Высшая школа, 1990.
5. Эшбах Г. Л. Практические сведения по вакуумной технике, — М.: Энергия, 1966.

Навчальне видання

Укладачі:

КОНОНЕНКО Сергій Ігнатович

ЖУРЕНКО Віталій Павлович

КАЛАНТАР'ЯН Оганес Ваганович

Відповідальний випусковий В. І. МУРАТОВ

Підписано до друку

Формат 60×84/16. Папір друк.офсет.

Ум. друк. арк. ?? Обл.-вид.арк. 1,2

Тираж 30 прим.

Харків, 61077, пл. Свободи, 4, ХНУ

Видавничий центр

RISO Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна