

К.Е. Демихов, А.А. Очков

Немеханические высоковакуумные средства откачки

Лабораторные работы

Учебно-методическое пособие



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н.Э. Баумана

2025

УДК 621.65
ББК 31.56
Д30

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8600/>

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

Рецензент

д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Направляющие
телекоммуникационные среды» МТУСИ С.Ю. Казанцев

Демихов, К. Е.

Д30

Немеханические высоковакуумные средства откачки. Лабо-
раторные работы : учебно-методическое пособие / К. Е. Демихов,
А. А. Очков. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана,
2025. — 43, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6739-6

В учебно-методическом пособии представлены четыре лабора-
торные работы по курсу «Немеханические высоковакуумные средства
откачки». По каждой лабораторной работе приведены цель работы,
краткие теоретические сведения, включая принципы действия не-
механических высоковакуумных средств откачки и методы расчета
параметров, а также основные этапы работы, содержание отчета, кон-
трольные вопросы и задания.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Проек-
тирование технологических машин и комплексов» и изучающих дис-
циплину «Немеханические высоковакуумные средства откачки».

УДК 621.65
ББК 31.56



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных
опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте:
press@bmstu.ru*

ISBN 978-5-7038-6739-6

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025

Предисловие

Лекционный курс «Немеханические высоковакуумные средства откачки» дополнен циклом лабораторных работ. Представленные в пособии лабораторные работы охватывают основные типы немеханических средств откачки: диффузионные парортутные и паромасляные, криоадсорбционные, ионно-геттерные (магниторазрядные) вакуумные насосы. В процессе выполнения работ предусматривается как изучение конструкций и принципов действия вакуумных насосов, так и расчет основных параметров. Особое внимание уделяется исследованию факторов, влияющих на эффективность откачки, и сравнению методов расчета характеристик вакуумных насосов.

Целью лабораторных работ является приобретение компетенций в области проектирования и расчета немеханических высоковакуумных средств откачки.

Задачи лабораторных работ: изучить устройство и принцип действия диффузионных вакуумных насосов, ознакомиться с их конструкциями и схемами подключения; исследовать процесс откачки газа диффузионным вакуумным насосом; определить основные характеристики диффузионного вакуумного насоса и расчетные зависимости для параметров ступени; исследовать влияние различных факторов на основные характеристики криоадсорбционных вакуумных насосов; рассчитать суммарную поглотительную способность криоадсорбционного вакуумного насоса по средней температуре для заданного варианта; изучить принцип работы ионно-геттерных вакуумных насосов, исследовать влияние различных факторов на их характеристики и рассчитать основные параметры.

Описание каждой лабораторной работы включает: цель работы, необходимый минимум теоретических сведений, основные этапы проведения работы, содержание отчета.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА ДИФфуЗИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Цель работы — изучить устройство и принцип действия диффузионного вакуумного насоса (ДВН), определить его основные параметры и исследовать влияние различных факторов на откачную характеристику.

Краткие теоретические сведения

Принцип действия диффузионного вакуумного насоса

Диффузионный вакуумный насос является высоковакуумным насосом, в котором откачка газа осуществляется за счет переноса молекул газа струей пара рабочей жидкости. При давлении $10^{-2} \dots 10^{-5}$ Па и ниже, для получения которого используют ДВН, длина свободного пути молекул откачиваемого газа практически всегда больше диаметра впускного отверстия насоса, и поэтому в нем всегда имеет место молекулярный режим течения газа. Молекулы газа, проходя при тепловом движении через впускной патрубков и так называемую диффузионную диафрагму (кольцевой зазор), образуемую стенками рабочей камеры и соплом, движутся по направлению к паровой струе. Но так как линии тока паровой струи направлены в сторону, противоположную движению потока, некоторая часть молекул газа из общего числа молекул, прошедших через впускной патрубков, столкнувшись с тяжелыми молекулами пара, отражается обратно и не попадает в струю. Остальные молекулы могут быть захвачены и увлечены струей.

Механизм захвата газа в диффузионных вакуумных насосах обусловлен диффузионными процессами. Вследствие разности концентраций газа над струей пара и в струе (концентрация газа

в струе вблизи сопла практически равна нулю) происходит диффузия газа в струю. Скорость диффузии неодинакова по длине струи: вблизи сопла она больше, так как разность концентраций газа там наибольшая; по мере удаления от сопла струя насыщается газом, разность концентраций уменьшается, соответственно снижается скорость диффузии газа в струю. Попав в струю, молекулы газа получают импульсы от молекул пара в направлении потока и уносятся вместе со струей к стенкам рабочей камеры насоса.

Увлекая газ к стенкам насоса, струя пара сжимает газ до выпускного давления; при этом пар конденсируется на охлаждаемой стенке, а газ, получив импульс от струи в направлении откачки, перетекает вдоль стенки в узком пристеночном слое к выпускному патрубку насоса.

Наряду с прямой диффузией газа существует и обратная диффузия в струю со стороны предварительного разрежения. Однако в этом случае молекулы газа, движущиеся по направлению к струе, сталкиваются с встречными им молекулами пара и оттесняются обратно; лишь небольшая часть молекул газа сможет продиффундировать через струю в область выпускного патрубка. Поскольку струя пара всегда истекает в направлении откачки (от выпускного отверстия к выпускному), количество молекул газа, диффундирующих через струю со стороны предварительного разрежения, при нормальном режиме работы насоса мало по сравнению с количеством молекул газа, диффундирующих в струю со стороны выпускного патрубка.

В связи с этим существенную роль для работы ДВН играет угол, образуемый струей и стенкой насоса. Чем меньше угол наклона сопла к стенке насоса, тем больше быстрота действия насоса, и, наоборот, с увеличением угла наклона быстрота действия уменьшается.

Быстрота действия диффузионных вакуумных насосов

В рабочем диапазоне давлений быстрота действия ДВН не зависит от выпускного давления (рис. 1.1, участок II) и уменьшается в области низких (участок I) и высоких (участок III) давлений. Уменьшение быстроты действия при низком давлении обусловлено тем, что в этой области проявляется обратный поток газа через паровую струю. Кроме того, существенную роль начинают играть газы, выносимые с паровой струей из кипятильника насоса и выделяемые стенками насоса.

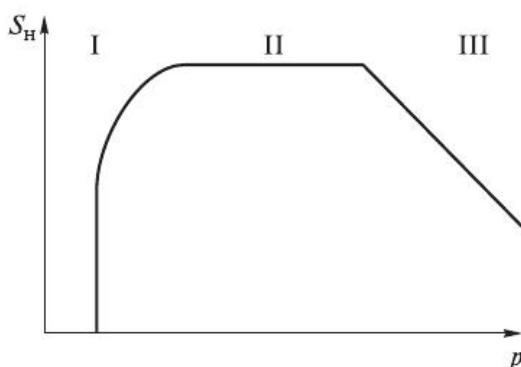


Рис. 1.1. Зависимость быстроты действия S_n диффузионного вакуумного насоса от впускного давления p

По мере увеличения впускного давления поток откачиваемого газа возрастает по сравнению с обратным потоком газа. Когда эти потоки становятся несоизмеримыми, быстрота действия перестает зависеть от впускного давления (участок II).

Увеличение выпускного давления приводит к возникновению скачка уплотнений в струе, перемещению его к соплу и отрыву струи от стенок насоса, сопровождающемуся потоком молекул газа из области форвакуума в область высокого вакуума (участок III).

Факторы, определяющие предельное остаточное давление диффузионных вакуумных насосов

Предельное остаточное давление ДВН определяется: обратной диффузией газа со стороны форвакуума; давлением пара жидкости при температуре стенок насоса; выносом газов, частично растворенных в конденсате, и продуктов термического крекинга масла со струей пара из кипятильника; газовыделениями с поверхности стенок насоса.

Давление пара рабочей жидкости насоса (за исключением ртути) обычно на несколько порядков меньше реального предельного остаточного давления и поэтому не влияет на него. Однако при повышении температуры стенки насоса это влияние может оказаться существенным. Так, при повышении температуры воды, охлаждающей насос, от 293 до 323 К предельное остаточное давление при работе на масле ВМ-1 возрастает в несколько раз,

а в насосе с воздушным охлаждением при таком же повышении температуры охлаждающего воздуха — на два порядка. Обезгаживание стенок насоса прогревом до температуры 370 К позволяет понизить предельное остаточное давление более чем на порядок.

Конструкции диффузионных парортутных вакуумных насосов

Особенности конструкций диффузионных парортутных вакуумных насосов обусловлены двумя основными свойствами ртути как рабочей жидкости: однородностью и химической активностью. Благодаря тому, что ртуть является однородной жидкостью, состав которой не изменяется в кипятильнике насоса, питание всех ступеней насоса осуществляется паром одного состава.

Химическая активность ртути обуславливает выбор конструкционных материалов насоса. Обычно диффузионные парортутные вакуумные насосы изготавливают из стекла или коррозионно-стойкой стали, что позволяет избежать коррозии насоса при длительных его остановках.

Одним из наиболее распространенных типов диффузионных парортутных вакуумных насосов, применяемых главным образом в лабораториях, является одноступенчатый стеклянный вакуумный насос (рис. 1.2).

Устройство насоса очень простое и понятно из рис. 1.2. Сопло в насосе из соображений простоты изготовления выполнено цилиндрическим. Такие насосы изготавливают разных размеров с различными характеристиками.

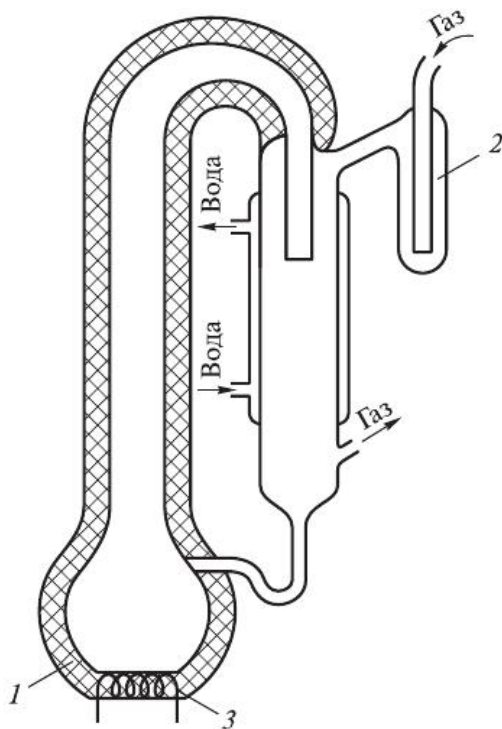


Рис. 1.2. Одноступенчатый стеклянный вакуумный насос:

1 — ловушка для паров ртути; 2 — теплоизоляция; 3 — нагреватель

Содержание

Предисловие	3
Лабораторная работа № 1. Изучение устройства диффузионного вакуумного насоса	4
Краткие теоретические сведения	4
Основные этапы проведения работы	14
Содержание отчета	14
Контрольные вопросы и задания	15
Лабораторная работа № 2. Исследование процесса откачки газа диффузионным вакуумным насосом	16
Краткие теоретические сведения	16
Основные этапы проведения работы	21
Содержание отчета	22
Контрольные вопросы и задания	22
Лабораторная работа № 3. Исследование влияния различных факторов на основные характеристики криоадсорбционных вакуумных насосов	23
Краткие теоретические сведения	23
Основные этапы проведения работы	30
Содержание отчета	31
Контрольные вопросы и задания	31
Лабораторная работа № 4. Исследование влияния различных факторов на основные характеристики ионно-геттерных вакуумных насосов	33
Краткие теоретические сведения	33
Основные этапы проведения работы	41
Содержание отчета	41
Контрольные вопросы и задания	41
Литература	42