

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

Основы технологии оптических материалов и изделий

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления 200700.62 – Фотоника и  
оптоинформатика

2011

**621.385**

**О-662**

**УДК 621.385:620.165.29(076.5)**

**Орликов, Леонид Николаевич.**

Исследование вакуумной системы = Основы технологии оптических материалов и изделий: методические указания к лабораторной работе для студентов направления 200700.62 – Фотоника и оптоинформатика / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2011. - 13 с.

Целью настоящей работы является изучение методов и приемов работы на электро-физических установках технологического назначения, ознакомление с принципами действия и основными характеристиками аппаратуры, применяемой для контроля технологических операций.

В ходе выполнения работы у студентов формируются:

- способность выполнять задания в области сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов (ПК-25);
- способность разрабатывать инструкции по эксплуатации используемых технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала (ПК-32).

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «Основы технологии оптических материалов и изделий».

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ  
Зав.кафедрой ЭП  
\_\_\_\_\_ С.М. Шандаров  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2011 г.

Основы технологии оптических материалов и изделий

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления 200700.62 – Фотоника и оптоинформатика

Разработчик

д-р техн. наук, проф.каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ Л.Н.Орликов  
\_\_\_\_\_ 2011 г

## Содержание

1	Введение .....	5
2	Теоретическая часть .....	5
2.1	Вакуумная система .....	5
2.2	Расчет вакуумной системы .....	6
2.3	Расчет проводимости вакуумных коммуникаций .....	7
2.4	Расчет времени откачки .....	8
2.5	Анализ расчета .....	8
2.6	Контрольные вопросы .....	9
3	Экспериментальная часть .....	9
3.1	Алгоритм работы с установкой .....	9
3.2	Заключительный этап выполнения работы .....	10
3.2	Задание на работу .....	10
3.3	Методические указания по выполнению работы .....	11
3.4	Аварийные режимы, возникающие при работе на вакуумных установках и методы их устранения .....	11
3.5	Содержание отчета .....	12
4	Рекомендуемая литература .....	12

## 1 Введение

Целью настоящей работы является изучение методов и приемов работы на электрофизических установках технологического назначения, ознакомление с принципами действия и основными характеристиками аппаратуры, применяемой для контроля технологических операций.

В итоге выполнения лабораторной работы студент должен

- *знать*: физические принципы работы приборов и оборудования, обеспечивающего производство электроники и наноэлектроники; основные приемы построения последовательностей технологических операций при обеспечении рабочей среды для формирования и синтеза оптических материалов;

- *уметь*: ориентироваться в многообразии современных вакуумных технологий, применяемых при производстве приборов электроники и наноэлектроники; разрабатывать принципиальные схемы последовательностей технологических операций, обеспечивающих функционирование оборудования; определять экспериментальным или расчетным путем оптимальные режимы проведения технологических операций; использовать для анализа процессов стандартные программные продукты;

- *владеть* основными навыками анализа достоинств и недостатков известных вакуумных технологий формирования оптических покрытий на элементах электроники и наноэлектроники.

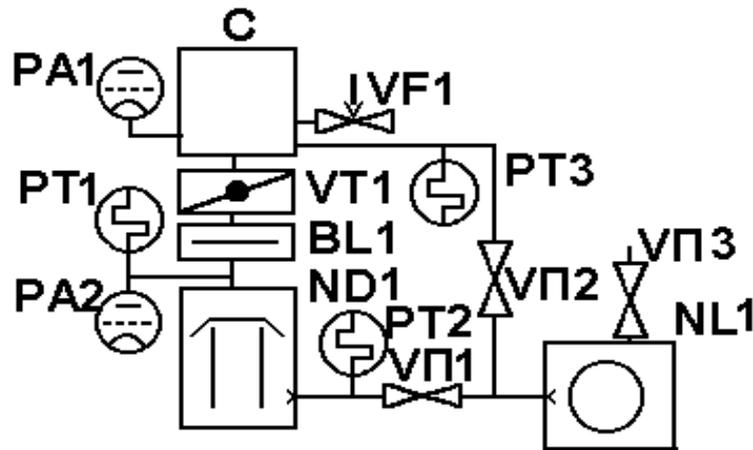
## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Вакуумная система

Для изготовления приборов различного назначения требуются вакуумные системы с различными возможностями по скорости удаления газов, по содержанию паров рабочих масел, по предельному давлению и т.д. На рис 1.1 представлена типовая схема вакуумной установки общего назначения, вакуумная схема является универсальной. Она состоит из стандартных типовых элементов.

Перед запуском вакуумной системы требуется закрыть все вентили и подать воду на охлаждение установки. Затем включается механический форвакуумный насос и открываются вентили *VII1* и *VII2*. После обеспечения в системе давления равного давлению запуска диффузионного насоса ( $P_2 = 10$  Па) можно включить диффузионный насос *ND1*.

По истечении 45-50 минут диффузионный насос выйдет на рабочий режим и в его объеме разовьется вакуум порядка 0,01 Па. Затем закрывается вентиль обводной откачки камеры *VII2* и открывается высоковакуумный затвор *VI1*. По истечении 5-10 минут в вакуумной камере реализуется давление 0,01 Па, достаточное для проведения последующих операций.



*BL1* – ловушка масел; *C* – вакуумная камера; *ND1* – высоковакуумный (диффузионный) насос; *NL1* – форвакуумный (механический) насос; *PA1*, *PA2* – датчики давления; *PT1-PT3* – термопарные датчики; *VF1* – натекатель газа; *VP1-VP3* – вентили; *VT1* – вакуумный затвор.

Рисунок 1.1 – Типовая схема вакуумной системы

## 2.2 Расчет вакуумной системы

Количество напускаемого и выделяемого газов должно быть согласовано с возможностями откачных средств.

Суммарный поток газовой выделения из камеры складывается из выделения газов из стенок камеры, из детали и из потока напускаемых технологических газов. Для насосов средней производительности поток напускаемых газов составляет  $Q_{нат} \sim 10^{-4}$  торл/с.

Кроме потока натекания в камеру поступает газ через уплотнения вводов систем индикации параметров, уплотнения токовводов, уплотнения мест сопряжения камеры с вакуумнасосами и др. Таких уплотнений в вакуумной камере не менее 10. Общий поток газа через технологические уплотнения рассчитывается как произведение чувствительности течеискателя ( $\sim 10^{-6}$  торл/с) на количество  $N$  технологических течей ( $>10$ )

$$Q_m = N \cdot 10.$$

Поток газовой выделения  $Q$  из изделий и камеры определяется произведением площади поверхности  $A$  на коэффициент удельного газовойделения  $g$  и коэффициент поверхности  $\Omega$

$$Q = Ag \cdot \Omega.$$

Величины удельного газовойделения приводятся в соответствующей справочной литературе (для стекла и керамики  $g=10^{-4}$  Па м<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>). Коэффициент поверхности зависит от качества механической обработки материала (для стали достигает 10). Таким образом, суммарный поток газов в вакуумной камере определится выражением:

$$\sum Q = (Ag \cdot \Omega)_к + (Ag \cdot \Omega)_д + Q_{нат},$$

где первое слагаемое относится к камере, второе к детали.

Необходимую скорость откачки на высоком вакууме можно определить через отношение суммарного потока в вакуумной камере  $Q$  к рабочему давлению  $P_{раб}$ , при котором проводится технологический процесс:

$$S_H = \sum Q / P_{раб} .$$

Скорость откачки высоковакуумного насоса следует согласовывать со скоростью откачки форвакуумного насоса. Скорость откачки форвакуумного насоса определяется как отношение газового потока на выходе диффузионного насоса  $Q$  к выходному давлению диффузионного насоса  $P_{вых}$ .

$$S_{\phi} = Q / P_{вых} .$$

В подавляющем большинстве диффузионных насосов  $P_{вых}=10$  Па (0,1 мм рт ст). Следует заметить, что определенная нами скорость откачки насоса меньше паспортной и соответствует производительности при давлении 10 Па. Поэтому, следует просмотреть кривые производительности форвакуумных насосов от давления и выбрать тот насос, который обеспечивает требуемую  $S_{\phi}$  при 10 Па.

Из основного уравнения вакуумной техники следует, что скорость откачки объекта всегда меньше скорости откачки насоса. При проектировании систем, если проводимость коммуникаций неизвестна, выбирают скорость насоса с коэффициентом запаса  $\nu$ :

$$S_H = \nu S_0,$$

где  $\nu=1,25$  для форвакуумных насосов;  $\nu=2$  для высоковакуумных насосов

### 2.3 Расчет проводимости вакуумных коммуникаций

В таблице 2.1 приведены формулы расчета проводимостей для наиболее распространенных вакуумных элементов в системе СИ. (Размерность единиц: среднее давление на концах трубопровода  $P^*$  в паскалях, диаметр  $d$  и длина трубопровода  $l$  в метрах, проводимость в  $м^3 / с$ )

Таблица 2.1 – Некоторые соотношения для расчета проводимости

Режим	Трубопровод	Отверстие ( $4d > 20$ )
Вязкостный	$U_{\nu} = 1,36 \cdot 10^3 P \cdot d^4 / l$	$U_{\nu} = 157 d^2$
Молекулярно-вязкостный	$U_{\nu\phi} = U_{\nu} + 0,8 U_m$	$U_{\nu\phi} = U_{\nu} + 0,8 U_m$
Молекулярный	$U_m = 121 d^3 / l$	$U_m = 91 d^2$

При молекулярном режиме истечения газа, если диаметр отверстия выражен в сантиметрах, проводимость удобно определять по формуле:

$$U = 9,1 d^2 \text{ л/с}$$

## 2.4 Расчет времени откачки

Время откачки газа (в секундах) от атмосферного давления ( $P_1=10^5$  Па) до форвакуумного давления ( $P_2=10$  Па) определяется выражением:

$$t=V/S \ln P_1/P_2,$$

где  $S$ - скорость откачки камеры;  $V$ -объем камеры.

При откачке газа в диапазоне от атмосферного давления до 133 Па (1 мм рт ст) газ достаточно вязкий и проводимость трассы почти не влияет на эффективную скорость откачки. В этом случае время откачки можно рассчитать по формуле:

$$t=8V/S_H$$

Для расчета времени следует брать сумму нескольких времен:

1 – от атмосферного давления до 1333 Па (1 мм рт ст);

2 - от 133 Па до 10 Па;

3 – от 10 Па до 1 Па.

Для расчета берутся скорости насоса на середине интервала давлений из кривой зависимости производительности насоса от давления. Обычно время откачки объекта на форвакууме составляет до 15 минут.

Время откачки объекта на высоком вакууме определяется выражением:

$$t=(VV^1/S_0) \ln (P_1 - \sum Q/S_0)/(P_2 - \sum Q/S_H)$$

где  $V$ -объем откачиваемого объекта;  $V^1$  –приведенный объем;  $P_1$ ,  $P_2$  – начальное и конечное давление.

Процесс откачки соответствует изотермическому процессу ( $PV=const$ ), поэтому в расчетах времени откачки в диапазоне давлений когда существенно возрастают газовыделения (от 10 до 0,01 Па и менее) необходимо учитывать приведенный объем  $V^1$ , увеличенный пропорционально уменьшению давления. (Например, обеспечение рабочего вакуума 0,01 Па соответствует переходу от 10 до 1 Па, далее от 1 до 0,1 Па, а затем от 0,1 до 0,01 Па. Таким образом, уменьшение давления составляет три порядка. Соответственно приведенный объем составит величину  $10^3$ ).

При откачке на форвакууме газовыделениями пренебрегают ввиду их малости.

## 2.5 Анализ расчета

Обычно на производстве время проведения процесса откачки, включая запуск высоковакуумного оборудования не должно превышать 1 час. Если оно мало – следует корректировать коэффициент поверхности или приведенный объем. Если время проведения вакуумного этапа больше 1 часа - следует корректировать напуск газа и производительность откачных средств.

## 2.6 Контрольные вопросы

1. Проанализируйте основное уравнение вакуумной техники.
2. Запишите уравнение суммарного потока в вакуумной системе.
3. Приведите алгоритм расчета откачных средств, проводимости вакуумных коммуникаций и времени откачки системы.
4. Какое назначение газобалластного устройства?
5. Нарисуйте как изменяется мгновенная скорость откачки механического вакуумного насоса во времени.
6. Проанализируйте процессы, происходящие в системе при нарушении алгоритма включения или выключения.
7. Опишите принцип работы электроразрядных датчиков давления.
8. Проанализируйте физические ограничения предельных возможностей работы датчиков давления и откачных средств.
9. Назовите безмасляные механические вакуумные насосы.
10. Объясните физические процессы, положенные в основу градуировки датчиков давления.

## 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Алгоритм работы с установкой

*Алгоритм включения* установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) составить вакуумную схему установки;
- 2) закрыть все вентили;
- 3) перевести все тумблеры влево/вниз;
- 4) провести внешний осмотр установки на наличие нагревателя на диффузионном насосе, наличие воды для охлаждения, отсутствие посторонних предметов, проводов и т.п.;
- 5) провести импульсное включение механического насоса (рывками);
- 6) открыть обводную (байпасную) систему для откачки рабочей камеры;
- 7) по достижении вакуума  $\sim 0,1$  мм рт ст включить подачу воды для охлаждения диффузионного насоса, а также нагреватель диффузионного насоса и ждать 45 минут до выхода установки на высокий вакуум.

*Алгоритм выключения* установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) производится выключение измерительной аппаратуры и вакуумметров;
- 2) закрывается вентиль на входе диффузионного насоса. Выключается нагреватель диффузионного насоса. Выдерживается время  $\sim 40$  мин для остывания диффузионного насоса;
- 3) закрываются вентили на выходе диффузионного насоса;
- 4) выключается форвакуумный насос;

5) выключается охлаждение установки.

### 3.2 Заключительный этап выполнения работы

На заключительном этапе проводится выключение установки. Особенность выключения состоит в том, что диффузионный насос должен остыть во избежание выгорания масла. Время остывания составляет 45-50 минут. Все это время форвакуумный насос должен откачивать выход диффузионного насоса. Для сокращения времени проведения процесса между камерой и диффузионным насосом закрывают затвор и в камеру напускают воздух, достают детали, проводят их анализ. Таким образом, в процессе схода диффузионного насоса с режима параллельно проводятся операции по анализу покрытия. Последовательность технологических операций по выключению может выглядеть следующим образом.

Напыление закончено – закрыть затвор между рабочей камерой и диффузионным насосом (VT1) – снять нагрев диффузионного насоса – выключить измерительные приборы – напуск газа в камеру – анализ покрытия.

### 3.2 Задание на работу

1. Нарисовать масляный и безмасляный вариант вакуумной установки для проведения операций обработки материалов в вакууме. Указать напротив датчиков и вакуумнасосов диапазон их работы.
2. Нарисовать зависимости производительности откачных средств конкретной установки от давления и рода газа.
3. Рассчитать производительности откачных средств исходя из объема вакуумной камеры, удельном газовыделении всех материалов  $g=10^{-4}$  Пам<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup>, потоке напуска газа  $Q_n=(30-80) \times 2,4 \cdot 10^{-4}$  торл/с.
4. Построить график согласования откачных средств.
5. Записать алгоритм включения и выключения вакуумной установки.
6. Привести экспериментальную и расчетную кривую изменения давления во времени.
7. Рассчитать общее время откачки вакуумной камеры.
8. Описать принцип работы термодатчика и ионизационного датчиков давления.
9. При длине вакуумпровода от механического насоса до диффузионного  $L=2$  м и диаметром 40 мм рассчитать его проводимость.
10. Рассчитать эффективную скорость откачки объекта в вакуумной камере.
11. Расположив элементы вакуумной системы в одну линию, нарисовать распределение давления в данной вакуумной системе.
12. Привести чертеж вакуумного соединения (по одному на участника работы).

### 3.3 Методические указания по выполнению работы

При составлении вакуумной схемы следует учесть, что все вакуумные схемы и установки подобны и строятся по одному принципу: рабочая камера откачивается высоковакуумным насосом, а газ уплотняется до атмосферного давления. Каждый элемент вакуумной системы должен содержать вентиль для коммутации, датчик давления, а кое – где натекагель для напуска газа. Рекомендуются сравнивать результаты расчета проводимости и параметров откачных средств с массогабаритными параметрами этих средств из литературы или с имеющимися в конкретной установке. Следует ознакомиться с сертифицированной продукцией на коммутирующую вакуумную продукцию и провести сравнение с имеющейся на установке (ПК 25).

### 3.4 Аварийные режимы, возникающие при работе на вакуумных установках и методы их устранения

Несоблюдение последовательности включения или выключения установки, отключение электричества или воды, приводит к потере служебных характеристик установки.

Ниже приводится перечень наиболее встречающихся неприятностей при работе на установках и возможные приемы реанимации работоспособности:

1) *прекратилась подача воды* - необходимо выключить нагрев диффузионного насоса. Необходимо, чтобы работал механический насос до полного остывания диффузионного насоса;

2) прекратилась подача электроэнергии - необходимо перекрыть все вентили и выключить установку. Остудить диффузионный насос;

3) *забыли включить механический насос*, но включили диффузионный насос. Если прошло не более 10-15 мин необходимо снять нагрев, включить механический насос. Если прошло более 15 мин выключить установку и произвести переборку диффузионного насоса и заменить в нем масло;

4) *забыли открыть воду при запуске диффузионного насоса*. Необходимо снять нагрев диффузионного насоса. Пустить воду в насос после его остывания;

5) *открыли входной или выходной вентиль* работающего диффузионного насоса на атмосферу. Для реанимации необходима замена масла в диффузионном насосе;

6) *выключили форвакуумную откачку* при горячем диффузионном насосе. В этом случае необходимо включить форвакуумный насос и провести откачку горячего диффузионного насоса в течение 2-3 часов. Если по истечении этого времени диффузионный насос не обеспечит рабочий вакуум - провести замену масла в диффузионном насосе;

7) *начали измерение высоковакуумным датчиком ПМИ-2* при

форвакууме в вакуумной системе. Последствия - сгорает катод датчика. В этом случае продолжают работать «вслепую», ориентируясь по термопарному датчику.

Реанимация: по окончании работ и выключении установки провести замену датчика;

8) *выключили форвакуумный насос не закрыв вакуумные затворы.* После остановки насоса атмосферное давление выдавливает масло из форвакуумного насоса на выход диффузионного насоса. Подмес форвакуумного масла к высоковакуумному приведет к потере работоспособности диффузионного насоса. Если форвакуумный насос двухступенчатый – то выдавливание происходит в течение 5-10 минут. Если насос одноступенчатый – то происходит «выстрел» масла из форвакуумного насоса в диффузионный;

9) *вакуумные затворы закрыли, но не напустили атмосферный воздух в форвакуумный насос.* Масло из форвакуумного насоса поднимается до затвора. Лечение: провести напуск воздуха во всю вакуумную систему, прокрутить вакуумный насос вручную;

10) *нештатная ситуация:* изменение звука работающего механического насоса, запах масла, прорыв воды внутри установки или в вакуумной камере, оставление ручек и других посторонних предметов и т.п. В этих случаях следует принять меры по выключению установки.

### 3.5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) схему масляного и безмасляного варианта вакуумной установки, чертеж вакуумного соединения (по одному на участника работы).

2) зависимость производительности используемых откачных средств от давления и рода газа;

3) расчет производительности откачных средств, проводимости вакуумпровода, расчет общего времени откачки вакуумной камеры, эффективной скорости откачки объекта в вакуумной камере на ЭВМ (ПК 32);

4) график согласования откачных средств;

5) алгоритм включения и выключения вакуумной установки (ПК 32);

6) экспериментальную и расчетную кривую изменения давления во времени;

7) описание принципа работы термопарного и ионизационного датчиков давления;

8) распределение давления в данной вакуумной системе.

## 4 Рекомендуемая литература

1. Данилина Т.И. Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро- и нанотехнологии: учебное пособие / Томск, Томский

государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2005.– 316 с., ISBN 5-86889-244-5

2. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: методические указания к лабораторным работам. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 79 с.

3. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: Методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2009. – 400 с.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование вакуумной системы

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Основы технологии  
оптических материалов и изделий»

Усл. печ. л. 0.81 . Препринт  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40