

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 вакуумных технологий

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ВАКУУМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ**

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления  
210100.62 – Электроника и наноэлектроника

**621.5**  
**О-662**

**УДК 621.52(076.5)**

**Орликов, Леонид Николаевич.**

Исследование проводимости вакуумных коммуникаций = Основы вакуумных технологий: методические указания к лабораторной работе для студентов направления 210100.62 – Электроника и наноэлектроника / 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, 2013. - 14 с.

В данной работе на основании данных по расходу газа, давлениям, длине свободного пробега молекул проводится оптимизация одного параметра - проводимости. В общем случае задача сводится к генератору задачи, решаемой относительно требуемых параметров. Такие задачи без применения ЭВМ решать не представляется возможным. Кроме того, богатый математический аппарат вакуумной техники позволяет поддерживать системность в общении с компьютером, независимо от стартового уровня знаний в области.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19)

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 210100.62 – Электроника и наноэлектроника по курсу «Основы вакуумных технологий».

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  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Основы вакуумных технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ  
ВАКУУМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Методические указания к лабораторной работе  
для студентов направления 210100.62 – Электроника и нанoeлектроника

Разработчик

д-р техн. наук, проф.каф.ЭП  
\_\_\_\_\_ Л.Н.Орликов  
\_\_\_\_\_ 2013 г

2013

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
2. Теоретическая часть	3
2.1. Режимы течения газа	3
2.2. Критерии подобия течения газов	4
2.3. Сопротивление течения, проводимость	5
2.4. Контрольные вопросы	5
3. Экспериментальная часть	6
3.1. Вакуумное оборудование	6
3.2. Измерительное оборудование	7
3.3. Порядок работы на установке	7
3.4. Задание по экспериментальной части	8
4. Расчетная часть	9
4.1. Методика обработки результатов эксперимента	9
4.2. Расчетные соотношения для откачки через трубопровод	9
4.3. Соотношения для расчета параметров откачки	10
4.4. Задание по расчетной части	11
5. Содержание отчета	11
Рекомендуемая литература	11

## **1 ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время наука и техника испытывает острую нужду в передовых наукоемких технологиях, примером таких технологий могут быть электронно-ионные технологии с применением ЭВМ. Применение ЭВМ упрощает не только процесс управления оборудованием, но также помогает анализировать эффективность применяемых в производстве оборудования, кадров, приемлемость математического аппарата. С применением ЭВМ появляются новые точки зрения на протекание явлений и новые выводы по влиянию одних параметров на другие.

В подавляющем большинстве технологических процессов, средой для прохождения электронов и ионов является вакуум. Наука о вакууме довольно многогранна, однако до сих пор описание технологических процессов основано на экспериментальном материале.

При проведении исследования проводимости вакуумных коммуникаций исследователю приходится иметь дело с большим количеством данных, каждое из которых зависит от других. В данной работе на основании данных по расходу газа, давлениям, длине свободного пробега молекул проводится оптимизация одного параметра - проводимости. В общем случае задача сводится к генератору задачи, решаемой относительно требуемых параметров. Такие задачи без применения ЭВМ решать не представляется возможным. Кроме того, богатый математический аппарат вакуумной техники позволяет поддерживать системность в общении с компьютером, независимо от стартового уровня знаний в области ЭВМ.

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19).

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ**

### **2.1 Режимы течения газа**

В вакуумной технике различают несколько режимов течения газа:

1) турбулентные режимы: турбулентный, инерционный, инерционно-вязкостный);

2) ламинарные режимы: вязкостный, молекулярно-вязкостный, молекулярный, свободно-молекулярный.

В самом начале процесса откачки при атмосферном давлении в камере реализуется турбулентный режим течения газа, характеризующий хаотическое нерегулярное вихревое движение газовых масс. При этом давление в каждой точке вакуумной системы носит пульсирующий нестационарный характер.

При постепенном уменьшении давления поток газа приобретает инерционный характер. Такое движение газа свойственно при напусках газа в

вакуумную систему при разгерметизации, при продувках аэродинамических труб и сопел, при откачке больших потоков газа эжекторными насосами с атмосферного давления.

Инерционно-вязкостный режим проявляется в потоке газа пока на тело действует аэродинамическая сила сопротивления (вакуумная аэродинамическая труба).

По мере уменьшения давления образуются параллельно перемещающиеся слои газа. Скорости перемещения этих слоев относительно стенок постепенно возрастают от нуля до максимума к оси потока. Такое течение называется вязкостным ламинарным. Вязкостное течение реализуется при давлениях в трубопроводе порядка 0,5-30 мм рт.ст. В таком течении начинают проявляться эффекты трения между слоями газа, между газом и стенками вакуумпровода. Процесс ламинарного течения состоит в том, что на хаотическое движение молекул газа, подчиняющееся распределению Максвелла, под влиянием перепада давления накладывается дополнительная составляющая скорости движения в направлении градиента давления.

Объем газа, протекающий через поперечное сечение трубопровода в единицу времени при ламинарном течении, пропорционален перепаду давления на его концах. При постоянном же перепаде давления протекающий объем газа пропорционален размерам трубопровода.

В технологических установках наиболее распространены вязкостный, молекулярно-вязкостный и молекулярный режим течения газа.

Молекулярно-вязкостное течение характеризуется длинами пробега молекул достаточно малыми по сравнению с поперечными размерами трубопроводов и наличием на концах трубопровода не очень больших перепадов давления (меньше 0,528). Для характеристики режима течения гага, обычно используют среднее значение давления

$$\bar{P} = 1/2(P_1 - P_2) \quad (2.1)$$

Уменьшение давления сопровождается нарастанием независимости движения молекул друг относительно друга, молекулы движутся прямолинейно, пока не отразятся от стенок сосуда. Такое течение называют молекулярным или Кнудсеновским по имени первого исследователя. Оно реализуется при давлениях менее  $10^{-3}$  мм рт.ст.

Если число столкновений молекул газа пренебрежительно мало, но еще проявляются макроскопические свойства газа (концентрация порядка  $10^{10}$  см<sup>-3</sup>), то течение газа называют свободно-молекулярным.

## 2.2 Критерии подобия течения газов

Течение газов подобно между собой. Например, течение воздуха при давлении, близком к атмосферному, подобно течению фреона при давлении порядка 100 мм рт.ст. В качестве критерия подобия течений может выступать число Рейнольдса  $Re$ , число Кнудсена  $Kn$ , произведение давления на размер

трубопровода, величина потока газа и др.

Для воздуха при 20°C число Рейнольдса рассчитывается по формуле:

$$Re = (1/89) \cdot Q / d, \quad (2.2)$$

где  $Q$  - величина потока газа, см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> атм;

$d$  - диаметр трубопровода, см.

Число Кнудсена можно найти по формуле:

$$Kn = \lambda / d, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  - длина свободного пробега молекулы.

Длина свободного пробега равна (в метрах) определяется:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-5} / P,$$

где  $P$  - давление газа, мм рт.ст. Для воздуха при  $P = 1$  Па,  $\lambda = 5$  мм

При  $Re > 2200$ , режим течения, как правило, турбулентный, при  $Re < 1200$ , режим ламинарный. При  $Q > 2 \cdot 10^5$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> атм - режим турбулентный, при  $Q < 2 \cdot 10^5$  см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> атм - режим ламинарный. Режимы течения газа и их параметры приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Режимы течения газа

Критерии	$Re$	Kn	$Pd$ Па м	$Q$
Турбулентный	$>2200$	-	-	$>2 \cdot 10^5$
Вязкостный	$<1200$	$<10^{-2}$	1,33	$<2 \cdot 10^5$
Молекулярно- вязкостный	-	-	от 1,33 до 0,05	-
Молекулярно	-	$>0,33$	0,05	-

### 2.3 Сопротивление течению, проводимость

Для соединительных каналов вакуумной трассы введено понятие "сопротивление течению", эквивалентное понятию электрического сопротивления проводников. Аналогично прохождению электрического тока вместо сопротивления течению  $W$  вводят обратную ему величину  $U = \lambda/W$ , называемую проводимостью.

Применяя понятия: поток газа, сопротивление трубопровода (или его проводимость) для стационарного случая по аналогии с электрической цепью можно получить соотношение, аналогичное закону Ома

$$Q = (P_2 - P_1) / W = U(P_2 - P_1) \quad (2.4)$$

### 2.4 Контрольные вопросы

Контрольные вопросы заложены в ЭВМ. Копии контрольных вопросов ведаются студентам во время подготовки к лабораторной работе. Для включения общего рубильника установки необходимо дать правильные ответы на поставленные вопросы. При подготовке ответов рекомендуется

изучить соответствующие разделы учебной литературы.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 3.1 Вакуумное оборудование

Лабораторная работа выполняется на установке УВН-2М. Вакуумная схема установки состоит из высоковакуумного диффузионного паромасляного насоса Н-2Т, форвакуумного насоса 2НВР-5ДМ, вакуумпроводов, датчиков измерения давления, коммутирующей арматуры, средств измерения расхода газа.

Рабочая камера образована колпаком установки с объемом 120 л. Для измерения потока газа служат расходомеры бюреточного и дифференциального типа. Регулировка потока газа осуществляется с помощью игольчатого, либо шлангового натекателей VF1 или VP1.

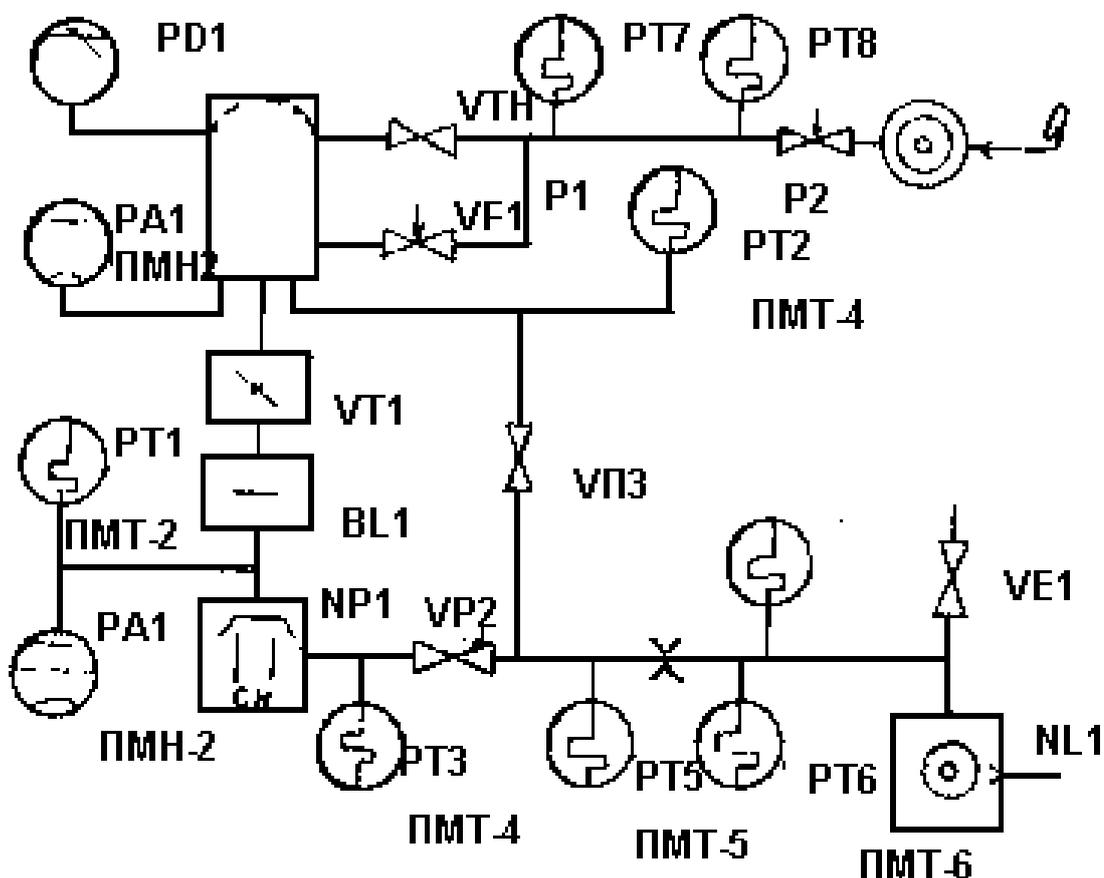


Рисунок 2.1 - Схема экспериментальной установки

Вращательный насос NL1 (2НВР-5ДМ) при помощи клапанов VP2 и VP3 может быть подключен либо к измерительному колпаку С, либо к диффузионному насосу ND1 (Н-2Т) для создания разряжения на выходе диффузионного насоса.

### 3.2 Измерительное оборудование

Манометрические преобразователи РТ5-РТ6 совместно с диафрагмой DP1 образуют потокомер, позволяющий измерять поток газа, поступающий в вакуумную систему установки. Для измерения потока газа при оценке проводимости трубопровода удобно применять расходомер бюреточного типа. Принцип действия такого расходомера основан на всасывании объема жидкости при атмосферном давлении, равном расходу газа в вакуумную систему.

Порядок работы с бюреточным расходомером заключается в следующем:

- 1) включается питание отсчетного устройства и нажимается кнопка ГОТОВО;
- 2) устанавливаются нулевые отметки счетчика импульсов;
- 3) немного открывается натекание газа;
- 4) перекрывается верхний кран расходомера.

За счет убыли газа, столб жидкости поднимается. При проходе фотодатчиков автоматически запускается система отсчета (50 импульсов в секунду). 15 мм высоты бюретки соответствует 1 см. После того как жидкость поднимется выше датчиков, следует сразу открыть верхний кран расходомера. Отсчет потока проводят из анализа времени. Для этого нужно число импульсов разделить на 50. При этом учитывают, что  $1 \text{ см}^3 \cdot \text{атм} \cdot \text{с}^{-1} = 10^{-1} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 7,6 \cdot 10^{-1} \text{ тор} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ см}^3 / \text{час}$ . Наиболее удобной переводной множитель:  $1 \text{ см}^3 \text{ атм} / \text{час} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ тор} \cdot \text{л} / \text{с}$ .

### 3.3 Порядок работы на установке

При работе на установке необходимо соблюдать следующий порядок включения и выключения установки:

а) порядок включения. Все клапаны и вентили должны быть закрыты, а тумблеры выключены. После того, как все будет проверено, подается вода в систему охлаждения диффузионного насоса. Установка подключается к электросети, при этом загорается лампа СЕТЬ. Включается механический насос NL 1. При нормальной работе насоса давление на его входе должно быть в пределах 1-10 Па. Открывается клапан VP2 на выходе диффузионного насоса и система откачивается до давления 1-10 Па. Включается нагреватель диффузионного насоса и фиксируется давление на его входе. После выхода насоса Н-2Т на рабочий режим (через 40-90 мин после включения) при давлении на входе диффузионного насоса менее  $10^{-1}$  Па открывается клапан VT1, а клапан обводной системы VПЗ закрывается;

б) порядок выключения. Сначала выключается измерительная аппаратура, закрываются все вентили, клапаны и затворы, кроме вентиля VП2 на выходе диффузионного насоса. Выключается нагреватель диффузионного

насоса. Для ускорения охлаждения насоса с него снимается нагреватель и включается вентилятор для обдува насоса. Проверяется температура днища насоса. Она должна быть не более  $70^{\circ}$ . Затем выключается механический насос, напускается воздух в объем насоса нажатием кнопки «НАТЕКАТЕЛЬ».

**ПРИМЕЧАНИЕ.** Выключение без закрытия затворов или без напуска газа приведет к засасыванию масла из форвакуумного насоса в вакуумпровода и в диффузионный насос.

Во избежание аварийных режимов рекомендуется держать закрытым тарельчатый клапан на входе диффузионного насоса и открывать его только на время проведения откачки камеры до высокого вакуума. Подключение расходомеров следует проводить только после открытия натекателя во избежание выброса масла из расходомера.

Во избежание выхода диффузионного насоса из строя не рекомендуется выключать откачку диффузионного насоса при температуре днища насоса более  $70^{\circ}$ .

При снятой плитке нагревателя температура должна быть такой чтобы ладонь не днище выдерживала 1-2 мин. Эксперименты следует планировать так, чтобы учесть время выхода диффузионного насоса на режим (40-50 мин) и выхода из режима (30 - 40 мин). При проведении экспериментов с напуском газа ионизационные датчики давления должны быть отключены.

### **3.4 Задание по экспериментальной части**

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19).

3.4.1. Ознакомиться с вакуумной схемой установки и привести условные обозначения ее элементов.

3.4.2. Привести зависимости производительности вакуумных насосов от давления.

3.4.3. Зарисовать конструкции датчиков давления, применяемых в работе (термопарного и датчика сопротивления) и оценить предельные возможности измерения давлений с их помощью.

3.4.4. Снять зависимости расхода газа бюреточным расходомером при различных длинах исследуемого трубопровода.

3.4.5. Измерить распределение давления газа в системе и оценить режимы течения газа в ее отдельных участках (обводной системе, на выходе диффузионного насоса, на выходе насосов, в трактах напуска газа и т.д.).

3.4.8. Оценить скорость откачки механического насоса в зависимости от расхода газа.

3.4.7. Привести алгоритмы включения и выключения установки.

3.4.8. Снять кривую естественного газоотделения в камере (при

включенной откачке).

3.4.9. Провести измерение времени откачки вакуумной системы от 360 мм рт.ст. до  $5 \times 10^{-2}$  мм рт.ст.

## 4 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

### 4.1 Методика обработки результатов эксперимента

В ходе проведения лабораторной работы измеряется длина  $l$ ,  $Q$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ . Для определенного  $l$  вычисляется:

$$U = Q / (P_1 - P_2)$$

После проведения измерений и расчетов, нужно сравнить полученные данные значения  $U$ , а также построить теоретическую и экспериментальную зависимость:

$$U = f(l)$$

Обработку результатов следует начинать с определения режима течения газа, Программирование наиболее рационально проводить на языке высокого уровня типа Турбопascal, что обеспечивает достаточное обеспечение системными и программными средствами. Допускается обработка результатов в любом редакторе. Возможные варианты программирования и порядок работы на компьютере рассматриваются на соответствующих курсах.

### 4.2 Расчетные соотношения для откачки через трубопровод

4.2.1. При вязкостном режиме используются следующие выражения:

1) если проводимость измеряется в метрах кубических на секунду давление паскалях, диаметр и длина трубопровода в метрах, (т.е в системе СИ), то используют формулу:

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 Pd^4 / l; \quad (4.1)$$

2) если проводимость, диаметр и длина трубопровода измеряется в системе СИ, а давление измеряется в миллиметрах ртутного столба используют формулу:

$$U_B = 1,88 \cdot 10^5 Pd^4 / l; \quad (4.2)$$

3) если давление измеряется в паскалях, а проводимость – в литрах за секунду, диаметр и длина трубопровода в сантиметрах, используют формулу:

$$U_B = 0,18 \cdot Pd^4 / l. \quad (4.3)$$

4.2.2. При молекулярном режиме используются следующие выражения:

1) если проводимость измеряется в метр кубический на секунду, диаметр и длина трубопровода в метрах (система СИ), то используют формулу:

$$U_M = 121 \cdot d^3 / l \quad (4.4)$$

2) если проводимость измеряется в литрах на секунду, диаметр и длина трубопровода в сантиметрах, используется формула:

$$U_M = 12,1 \cdot d^3 / l \quad (4.5)$$

3) если проводимость, диаметр и длина трубопровода измеряется в тех же единицах, что и в формуле (4.5) можно использовать еще одну формулу:

$$U_M = 3,8 \sqrt{T/M} d^3 / l \quad (4.6)$$

4.2.3. При молекулярно-вязкостном режиме используются следующие выражения:

$$U_{MB} = U_B + bU_M \quad (4.7)$$

где

$$b \approx 0,8$$

4.2.4. Зависимость проводимости от рода газа определяется по формуле:

$$U_\Gamma = \sqrt{29/M_\Gamma} U_B \cdot \lambda_B / \lambda_\Gamma,$$

где индексы "Г" и "В" относятся соответственно к газу т. к. воздуху;  $M$  - молекулярный вес.

4.2.5 Зависимость проводимости вакуумпровода от температуры газа выражается соотношением:

$$U_{C^0} = \sqrt{T/293} \cdot U_{20^0C} \quad (4.9)$$

где  $T$  - температура газа в градусах Кельвина;

$U_{C^0}, U_{20^0C}$  - проводимости при исследуемой температуре и температуре 20 °С.

### 4.3 Соотношения для расчета параметров откачки

Скорость откачки объекта  $S$  выражается основным уравнением вакуумной техники через скорость откачки насоса

$$1/S_0 = 1/S_H + 1/U \quad (4.10)$$

В свою очередь скорость откачки насоса  $S_H$  можно определить через рабочее давление  $P_{РАБ}$

$$S_H = Q/P_{РАБ} \quad (4.11)$$

С другой стороны поток газа в системе можно определить из анализа изменения давления во время откачки, т.е.

$$Q = V \cdot dP/dt \quad (4.12)$$

Время откачки объекта определяйся выражением

$$t = (V/S_o) \ln \left( \frac{P_1 - \sum Q/S_o}{P_2 - \sum Q/S_n} \right) \quad (4.13)$$

где  $V$  - объем откачки;  
 $P_1, P_2$  - начальное и конечное давление;  
 $\sum Q/S_o$  - суммарный поток газовыделения и натекания.  
 $S_n, S_o$  – скорость откачки насоса и объекта  
 Поток газовыделения  $Q$  определяется:

$$Q = A \cdot q$$

где  $A$  – поверхность камеры;  
 $q$  – удельные газовыделения.

При расчете времени откачки необходимо учитывать, что скорость откачки насосов зависит от давления, поэтому время откачки представляет собой сумму времен, рассчитанных в наиболее характерных точках. Кроме того, процесс откачки соответствует изотермическому процессу ( $PV = \text{const}$ ). Это свидетельствует о том, что в расчетах необходимо учитывать приведенный объем газа  $V^1$ , увеличенный пропорционально уменьшению давления. Обычно  $V^1 = 10^{-3}$ .

#### 4.4 Задание по расчетной части

В ходе выполнения работы у студентов формируется способность строить простейшие физические и математические модели приборов, схем, устройств и установок электроники и наноэлектроники различного функционального назначения, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (ПК-19).

4.4.1. Рассчитать режим течения газа по исследуемому трубопроводу.

4.4.2. Рассчитать проводимость исследуемого трубопровода.

4.4.3. Рассчитать поток газа, используя теоретические значения проводимости и экспериментальные значения давлений.

4.4.4. Рассчитать время откачки рабочей камеры в диапазоне от 360 мм рт.ст. до  $5 \times 10^{-2}$  мм рт.ст.

4.4.5. Рассчитать поток газовыделений с вакуумной камеры.

### 5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) схему вакуумной установки (ПК 19);
- 2) таблицу диапазона работы датчиков ПМТ-2, ПМИ-2 (ПК 19);;
- 3) зависимость скорости откачки диффузионного и механического насоса от давления (ПК 19); ;
- 4) зависимость проводимости вакуумного трубопровода от длины

(экспериментальную и теоретическую) (ПК 19);;

5) зависимость времени откачки объекта от исходных давлений (экспериментальную и расчетную) (ПК 19); ;

6) программу для расчета (ПК 19);;

7) зависимость времени откачки колпака от времени анализа потока газа (ПК 19);.

## **РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.

2. Барыбин В.Г. Физико-технологические основы электроники. – СПб.: Лань, 2001. –270 с.

3. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро- и нанотехнологий / учеб. пособие. – Томск.: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники., 2005. – 316 с.

4. Орликов Л.Н. Вакуумные и специальные вопросы технологии приборов квантовой и оптической электроники: учебное пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2013. – 102 с.

5. Фигурнов В.Э. IBM PC для пользователя : Краткий курс / В.Э. Фигурнов. - 7-е изд., сокр. версия. - М. : ИНФРА-М, 2001. – 479 с

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование проводимости вакуумных коммуникаций

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Основы вакуумных технологий»

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