

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени М.И.КАЛИНИНА

РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ЭЭМ

Методические указания  
к курсовому проекту

Составители: Леонид Николаевич Розанов,  
Василий Евгеньевич Сказываев,  
Марина Михайловна Донская

РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ЭЭМ

Методические указания к курсовому проекту

Редактор С.А.Мартынова  
Технический редактор А.И.Колодяжная

Подписано к печати 07.06.69      формат бумаги 60x90 1/16.  
Бумага тип. № 3. Печать офсетная. Усл.печ.л.3,75 Уч.-изд.л.3,75  
Тираж 5700      Заказ 336      Бесплатно.  
Издание ЛПИ им. М.И.Калинина. 196251, Ленинград, Политехническийкал.29.  
Отпечатано на ротационной ЛПИ им. М.И.Калинина.  
196251, Ленинград, Политехническийкал. ул. 29.

ЛЕНИНГРАД 1969

Расчет вакуумных систем с помощью ЭИМ: Методические указания к курсовому проекту / Сост. Л.Н.Резанов, В.Е.Сказываев, М.М.Дюновал. - Л., ЛПИ, 1989. - 60 с.

Методические указания предназначены для студентов специальности "Электронное машиностроение", изучающих курс "Вакуумная техника".

В указанных расностроена методика автоматизированного расчета вакуумных систем технологического оборудования электронной промышленности, приводится краткое описание эксплуатации электронных документов программы "Автоматизированное функциональное проектирование принципиальных вакуумных схем", даны методика проверочного расчета и пример его выполнения.

Рекомендованы к изданию кафедрой "Автоматизация" и методическим советом механико-машиностроительного факультета.

## ЦЕЛЕДИЯНИЕ

Цель Дашей работ над курсовым проектом "Вакуумная техника" - умение выполнять оптимальный расчет при проектировании вакуумных систем с помощью САПР. Для этого Вам необходимо выполнить следующие виды работ:

- проектировочный расчет вакуумной системы;
- проверочный расчет вакуумной системы;
- разработку компоновочной схемы;
- разработку общего вида вакуумного агрегата.

Задачей проектировочного расчета является выбор вакуумных насосов, аппаратур, трубопроводов и способа их соединения. Основные исходные данные для проектировочного расчета - суммарное газоподделение, рабочее давление и характерный размер вакуумной камеры. При выполнении проектировочного расчета Вы можете использовать разработанную в ЛПИ им.М.И.Калинина программу "Автоматизированное функциональное проектирование принципиальных вакуумных схем" (версия 01) [1, 2]. Программа установлена на персональном компьютере ГРАС. Эта программа предназначена на автоматизированном рабочем месте машиностроителя АИМ-М и позволяет значительно сократить время проектирования. Алгоритм проектировочного расчета основан на использовании базы данных, содержащей сведения о характеристиках современного вакуумного оборудования, и позволяет оптимизировать результаты проектирования по критерию минимума приведенных расходов оборудования затрат. Результатом работы программы является вывод в алфавитно-цифровой форме на АИИУ или на графопроекторе принципиальной вакуумной схемы агрегата.

Проверочный расчет принципиальной вакуумной схемы Вам следует выполнять вручную для улучшения понимания методов расчета. Он включает в себя расчет газовой нагрузки (газоподделение, газопонижаемость, нагнетание) и распределения давления в вакуумной системе, определение времени нестационарного режима работы. В случае подтвержде-

ния результатов машинного расчета Вы выполняете остальные виды работ.

Компоновочная схема вакуумного агрегата разрабатывается Вами на основе принципиальной схемы, полученной при помощи ЭММ, и данных по габаритным и присоединительным размерам выбранных элементов вакуумной системы. При разработке компоновочной схемы должен быть обеспечен минимальный объем вакуумного агрегата.

На основе компоновочной схемы разрабатывается чертёж общего вида вакуумного агрегата.

Пояснительная записка содержит: задание, результаты машинного расчета в виде принципиальной вакуумной схемы и ее описания, проверочный расчет вакуумной системы и компоновочную схему.

Графическая часть курсового проекта (оригиналы и компоновочные схемы и чертёж общего вида агрегата).

## I. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ВАКУУМНЫХ СХЕМ

### I.1. Общее описание

Назначение программы. Изменение ЭММ при проектировании принципиальных вакуумных схем позволяет использовать сложные алгоритмы оптимального проектирования, улучшить информационное обеспечение, избавиться от случайных ошибок, освободить проектировщика от рутинных расчетов и оформительских работ. При этом появляется экономический эффект за счет уменьшения сроков, улучшения качества и снижения трудоемкости проектирования. В первой версии программы для автоматизированного проектирования принципиальных вакуумных схем проектирование осуществляется по оптимальному коэффициенту использования вакуумных насосов, определенному из условия минимума приведенных народнохозяйственных затрат.

Программа может быть использована для проектирования вакуумных агрегатов, отнявших воздух или азот только при стационарном режиме течения газов и конвективной температуре. На рис. I.1 показан максимальный набор элементов, из которых может быть автоматически оптимизирована принципиальная вакуумная схема, содержащая не более трех участков. Диапазон рабочих давлений — от  $10^{-7}$  Па до 10 Па, газовых потоков — от  $10^{-8}$  м<sup>3</sup> Па/с до 1 м<sup>3</sup> Па/с.

Теоретические сведения, используемые в процессе проектирования, основаны на закономерностях течения газа в ограниченных объемах, изучаемых вакуумной техникой.

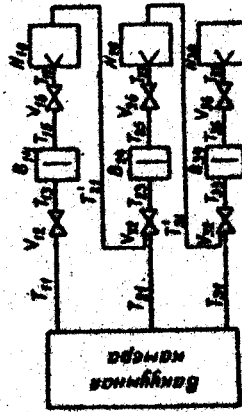


Рис. I.1. Максимальный набор элементов для проектирования принципиальной вакуумной схемы:  $V_1 - V_3$  - трубопроводы;  $P_1 - P_3$  - насосы;  $M_1 - M_3$  - клапаны

Для описания течения газа в вакуумной системе используется модель механики сплошной среды газ-воздух при температуре 20° С, режим течения газа - стационарный. Рассматриваются только вакуумные системы с сосредоточенными параметрами и трубопроводами круглого поперечного сечения  $U$ . Газовый поток  $Q$  в вакуумной системе в этом случае постоянен для различных сечений вакуумной системы и не изменяется во время работы вакуумной установки:

$$Q = U(P_1 - P_2) = S \cdot P, \quad (1.1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - давление в начале и конце элемента вакуумной системы;  $U$  - проводимость элемента вакуумной системы;  $S$  - быстрота откачки насоса в сечении вакуумной системы, давление в котором равно  $P$ .

С учетом коэффициента использования вакуумного насоса, определяемого отношением эффективной быстроты откачки объема к быстроте откачки насоса,

$$K_H = \frac{S_{эф}}{S_H}, \quad (1.2)$$

Уравнение, связывающее между собой основные параметры вакуумной системы, можно записать в следующем виде:

$$U = S_H \frac{K_H}{1 - K_H}. \quad (1.3)$$

Эффективная быстрота откачки объема в стационарном режиме постоянна и равна скорости натекания и газовой скорости  $S_{эф}$ . С учетом уравнения (1.1), используя исходные данные, можно выписать

$$S_{эф} = S_H Q = \frac{Q}{P_{эф}}, \quad (1.4)$$

где  $Q$  - суммарное газоразделение и натекание в вакуумную камеру, м<sup>3</sup> Па/с;  $P_{эф}$  - рабочее давление в вакуумной камере, Па. Проводимость элементов вакуумных систем с учетом ранее указанных ограничений на род, температуру газа и форму трубопровода определяется в м<sup>3</sup>/с по формуле Кудсова, справедливой для вязкостного, молекулярно-вязкостного и молекулярного режимов течения газа [1],

$$U = \nu \cdot U_M + U_A, \quad (1.5)$$

где  $\nu = (1 + 2,5d/2L)(1 + 3,1d/2L)$ ;  $d$  - диаметр;  $L$  - средняя длина свободного пробега, м; для воздуха  $L = 6,3 \cdot 10^{-3} P$ ;  $P$  - давление газа, Па;  $U_M$  и  $U_A$  - проводимость элемента в молекулярном

и вязкостном режимах. Для круглых трубопроводов

$$U_M = 121 \frac{d^3}{L^2}; \quad U_A = 1360 \frac{d^2}{L^2} P_{эф},$$

где  $d$  и  $L$  - диаметр и длина круглого трубопровода, м, а  $P_{эф}$  - среднее давление в трубопроводе. Для отверстий

$$U_M = 91 d^2 / (1 - (d/d_0)^2); \quad U_A = 830 d^2 / L - (d/d_0)^2,$$

где  $d$  - диаметр отверстия, м;  $d_0$  - диаметр предшествующего элемента, м.

Для остальных элементов вакуумных систем (забортов и лонжер) значения  $U_M$  и  $U_A$  берутся из таблиц, записанных в бэнке данных.

Все элементы участка вакуумной системы соединены последовательно, т.е. общая проводимость участка

$$\frac{1}{U_{сб}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{U_i}, \quad (1.6)$$

где  $N$  - число элементов на участке;  $U_i$  - проводимость  $i$ -го элемента.

Приведенные годовые затраты на откачку газа в вакуумной системе не равны сумме себестоимости и нормативной прибыли

$$П = C + EK, \quad (1.7)$$

где  $C$  - себестоимость работ вакуумной системы в течение года, руб/год;  $K$  - капитальные вложения в производственные фонды, научно-исследовательские работы и создание опытных образцов, руб;  $E$  - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ( $E = 0,15$  руб/год.руб).

Себестоимость работ вакуумной системы в течение года

$$C = \frac{K}{T} + 3, \quad (1.8)$$

где  $T$  - срок окупаемости, принимаем  $T = 10$  лет; 3 - годовые эксплуатационные затраты вакуумной системы.

Стоимость и эксплуатационные затраты элементов вакуумной системы изменяются в базе данных, стоимость трубопроводов рассчитывается в зависимости от их проводимости и длины по следующей формуле, определенной в результате экспертных оценок:

$$K_{\text{гпр}} = C_{2\text{гпр}} \cdot \psi_{\text{гпр}} \cdot \epsilon^S, \quad (1.9)$$

где  $\psi_{\text{гпр}}$  - проводимость трубопровода, м<sup>3</sup>/о;  $\epsilon$  - длина трубопровода, м;  $C_{2\text{гпр}}$ ,  $K_{2\text{гпр}}$  - постоянные, зависящие от условий производства.

Для индивидуального производства

$$S = 2,8; \quad K_{2\text{гпр}} = 0,33; \quad C_{2\text{гпр}} = 2000.$$

Структурный синтез вакуумной схемы осуществляется путем выбора вида, количества и способа соединения участков и элементов.

Вид элементов вакуумной системы определяется выбором из базы данных элемента с максимально возможными пределами давлением. Количество участков в схеме определяется методом усечения набора типовых элементов схемы (см. рис. 1.1) и зависит от рабочего давления в камере и максимального впускного давления. Могут быть выбраны один, два или три участка. Соединение участков в схеме в зависимости от видов насосов может быть последовательным, параллельным или смешанным. Проектирование следующих участков не проводится, если максимальное впускное давление насоса становится равным атмосферному давлению.

Число элементов на каждом участке схемы также определяется методом усечения. Например, при выборе сорбционного вакуумного насоса нет необходимости в использовании ловушки и второго клапана, которые в этом случае исключаются из структуры участка.

В результате в ЭЕМ создается структурная вакуумная схема. Внутренняя информация об этой схеме используется для проектирования принципиальной вакуумной схемы.

Параметрический синтез вакуумной схемы. В процессе параметрического синтеза принципиальной вакуумной схемы для каждого из участков решаются следующие основные задачи:

- 1) определение оптимального коэффициента использования насоса;
- 2) выбор типоразмера насоса по скорости откачки;
- 3) выбор типоразмеров клапанов, ловушек и диаметров соединительных трубопроводов;
- 4) расчет приведенных народнохозяйственных затрат.

Оптимальный коэффициент использования вакуумных насосов определяется из условия минимума приведенных народнохозяйственных затрат.

Капитальные и эксплуатационные затраты по отдельным видам элементов вакуумных систем аппроксимируются степенными функциями основных параметров элемента  $X_i$  (быстроты откачки или проводимости элемента) [1]:

$$K_i = A_i \cdot X_i^{m_i}; \quad Z_i = B_i \cdot X_i^{n_i}, \quad (1.10)$$

где индекс  $i = 1-8$  относится соответственно к элементам участвующим в вакуумной схеме (рис. 1.2).

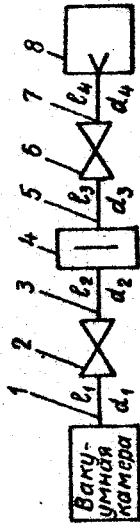


Рис. 1.2. Участок вакуумной схемы: 1, 3, 5, 7 - трубопроводы; 2, 6 - клапаны; 4 - ловушка; 8 - насос

С учетом сделанных допущений (1.8, 1.9, 1.10) приведенные годовые затраты  $j$ -го участка вакуумной схемы согласно (1.7) после преобразований можно представить в следующем виде:

$$\Pi_j = \left( E + \frac{1}{T} \right) \sum_{i=1}^8 A_i \cdot X_i^{m_i} + \sum_{i=1}^8 B_i \cdot X_i^{n_i}. \quad (1.11)$$

Коэффициенты  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $m_i$ ,  $n_i$  в формуле (1.11) выйрают, например, из табл. 1.6 - 1.8 в соответствии с результатом структурного синтеза, в процессе которого определены виды элементов. Для трубопроводов принимаем, что коэффициенты  $B_i = 0$ , а  $A_i$  зависят от длины трубопровода:

$$A_i = C_{2\text{гпр}} \cdot \epsilon^S, \quad (1.12)$$

где  $C_{2\text{гпр}} = 2000$ ;  $S = 2,8$ ;  $\epsilon$  - длина трубопровода, м.

Для последовательного соединения элементов примем, что значение проводимости каждого элемента соответствует равенству  $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = X_5 = X_6 = X_7$ . Это позволит нам уменьшить число переменных в уравнении (1.11) до двух. Используя уравнение (1.3), связывающее

между собой оставшихся две переменные, получим новое уравнение для приведенных затрат, зависящее только от одной переменной  $K_H$  - коэффициента использования насоса:

$$P = \sum_{i=1}^7 [V_i(1-K_H)^{-m_i} + W_i(1-K_H)^{-n_i}] + V_8 K_H^{-m_8} + W_8 K_H^{-n_8} \quad (1.13)$$

где

$$V_i = (E + \frac{1}{T}) A_i \left( \frac{7 Q_c}{P_{раб}} \right)^{m_i}; \quad W_i = B_i \left( \frac{7 Q_c}{P_{раб}} \right)^{n_i};$$

$$V_8 = (E + \frac{1}{T}) A_8 \left( \frac{Q_c}{P_{раб}} \right)^{m_8}; \quad W_8 = B_8 \left( \frac{Q_c}{P_{раб}} \right)^{n_8}.$$

Дифференцируем (1.13) по  $K_H$  и приравняв нулю полученное уравнение, имеем

$$\frac{dP}{dK_H} = \sum_{i=1}^8 C_{ss} (1-K_H)^{-K_{ss}} = \sum_{ss=1}^8 C_{ss} \cdot K_H^{-K_{ss}} \quad (1.14)$$

где

$$C_{11} = V_1 m_1; \quad K_{11} = m_1 + 1 \quad \text{при } S = 1 - 7; \quad i = 1 - 7;$$

$$C_{22} = W_1 n_1; \quad K_{22} = n_1 + 1 \quad \text{при } S = 7 - 14; \quad i = 1 - 7;$$

$$C_{33} = V_8 m_8; \quad K_{33} = m_8 + 1 \quad \text{при } SS = 1;$$

$$C_{44} = W_8 n_8; \quad K_{44} = n_8 + 1 \quad \text{при } SS = 2.$$

В простейшем случае для всех  $i = 1 - 7$  пусть  $n_i = m_i = 1$  и  $C_{33} = C_{44} = C_{ss} = C_H$ .

Тогда уравнение (1.14) можно упростить:

$$\left(1 - \frac{C_A}{C_H}\right) K_H^2 - 2 K_H + 1 = 0. \quad (1.15)$$

Решая уравнение (1.15), получим

$$K_H = \frac{1 - \sqrt{C_A/C_H}}{1 - C_A/C_H}. \quad (1.16)$$

Коэффициент  $C_A/C_H$  характеризует отношение затрат на приобретение и эксплуатацию арматуры к затратам на приобретение и эксплуатацию насосов. При  $C_A/C_H = 1$  следует очевидное значение  $K_H = 0,5$ .

На рис. 1.3 показана зависимость  $K_H$  от  $C_A/C_H$ . Значение оптимального коэффициента использования насоса будет различным на каждом участке вакуумной схемы.

Номинальную быстроту откачки насоса после преобразований (1.2, 1.3, 1.4) найдем по формуле

$$S_{нем} = \frac{Q}{K_H P_{раб} - P_{пр}} \quad (1.17)$$

где  $P_{пр}$  соответствует выбранному виду насоса;  $K_H$  - коэффициент использования насоса, найден на предпоследнем этапе параметрического синтеза;  $Q$  - газовый поток - исходная величина для проектирования.

В качестве  $P_{раб}$  для первого участка принимают давление, заманное в исходных данных. Для остальных участков берут максимальное давление для сорбционных насосов. Из базы данных выбирает насос, быстрота действия которого превышает  $S_{нем}$ .

Общая проводимость участка вакуумной системы с учетом найденного ранее оптимального значения коэффициента использования насоса  $K_H$  находят для  $S_{H} = S_{нем}$  по формуле (1.3). Общее число последовательных соединений элементов на участке при оптимальном условии равности проводимости всех элементов позволяет по формуле (1.6) найти проводимость одного элемента вакуумной системы. Значение  $\zeta$  может быть разным для каждого из участков. Из базы данных выбирает элемент, проводимости которого не отличается от требуемого значения более чем на 20%. Диаметр трубопроводов выбирают из стандартного ряда диаметров ( $m$ ): 0,008; 0,012; 0,02; 0,032; 0,05; 0,125; 0,2; 0,32; 0,5; 0,8; 1,25; 2; 3,15; 4; 5, из условия наименьшего отклонения общей

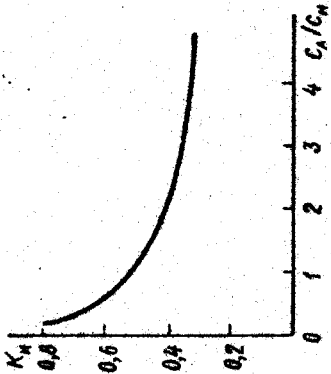


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента использования от соотношения капитальных и эксплуатационных затрат

раметрический - подпрограммой ELP и DTRMI. Подпрограмма SX организует графический вывод принципиальной вакуумной схемы на экран

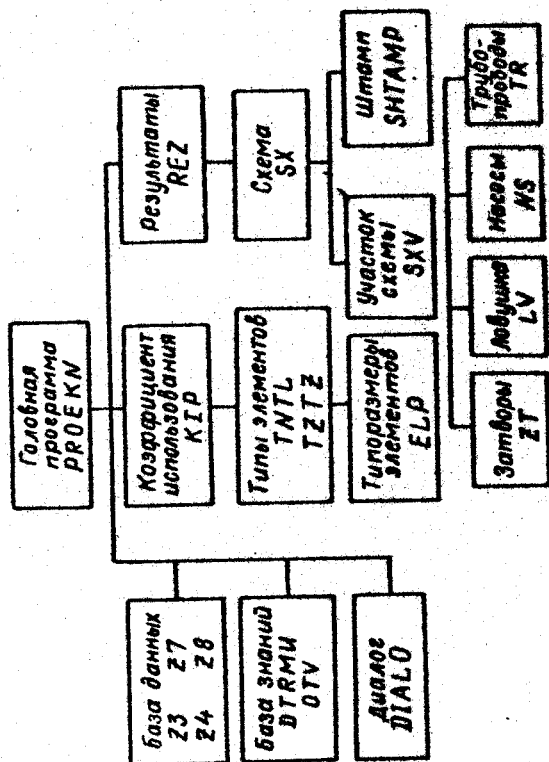


Рис. 1.4. Структурная схема пакета прикладных программ

графического дисплея или графопроектореь форматом M. Отдельными подпрограммами оформлены рамка и штамп: SHTAMP участок вакуумной схемы SXV, к которой возможно многократное обращение из головной программы.

С подпрограммой SXV связаны программные модули, вычерчивающие элементы вакуумной системы: TR - трубопроводов; ZAT - затворов и клапанов; LDV - ловушек; MAS - насосов.

При компоновке программы используется оверлейная структура построения загрузочного файла. При этом размеры сегментов определяются следующим образом:

- резидентный сегмент PRODEK, представляющий головную программу,
- составляет 10630 слов;
- оверлейная область: сегмент I-RASCH1, объединяющий все под-

проводимости спроектированного участка, определенной по формуле (1.6). Длины трубопроводов задает пользователь исходя из требований оптимальной компоновки вакуумного агрегата, при отсутствии таковых длина трубопроводов принимается равной 0,2 м.

Приведенные годовые затраты для спроектированной установки определяются по формуле (1.7) для каждого из участков по капитальным и эксплуатационным затратам элементов вакуумных систем, имеющихся в базе данных, капитальные затраты на соединительные трубопроводы рассчитывают по формуле (1.9). Затраты на эксплуатацию трубопроводов в этом расчете не учитываются.

#### 1.2. Руководство для системного программиста

**Общие сведения.** Программное обеспечение системы автоматизированного проектирования принципиальных вакуумных схем (в дальнейшем САПРПС) предназначено для разработки структур вакуумной схемы и выбора вакуумного оборудования (вакуумных насосов, ловушек, командной арматуры, соединительных трубопроводов) по заданному рабочему давлению, газовой потоку и эффективному размеру вакуумной камеры при установленном режиме работы вакуумной системы.

САПРПС предназначена для эксплуатации на автоматизированном рабочем месте разрабатчика АРМ.02/СМ или вычислительном комплексе под управлением ЭКМ ИЗОТ 1016С в операционной системе с разделением функций РАСОС 2/Б/00 106-01 (монитор-36, с пакетом прикладных программ машинной графики АРМ-М) или на другом аналогичном по архитектуре вычислительном комплексе, например ИЗОТ-1016С.

Программные и технические средства. Текст программы написан на языке Фортран и записан на магнитной ленте "ROLLIN K07". Структурная схема пакета прикладных программ показана на рис. 1.4. База знаний и данных включает в себя следующие программные модули:

- Z3 - характеристику вакуумных насосов;
- Z7 - характеристику вакуумных клапанов и затворов;
- Z4 - характеристику вакуумных ловушек;

DTRMI - проводимость трубопроводов в различных режимах;

OTV - проводимость отверстий в различных режимах.

Структурный синтез осуществляется при помощи подпрограмм KIP,

TNTL, TZTZ и часть алгоритма головной программы PRODEK, определяющей оптимальное значение проводимости элемента вакуумной схемы, а па-

программы по расчету и проектированию вакуумных систем, составляет 4169 слов;

- сегмент 2 - **DIALOG** - подпрограмма, осуществляющая диалог с пользователем по вводу входных данных для расчета, включает 3815 слов;

- сегмент 3 - **LRPI** - подпрограмма, предназначенная для вывода вакуумной схемы на экран графического дисплея, состоит из 4082 слов;

- сегмент 4 - **GRPOST** - подпрограмма, осуществляющая вывод вакуумной схемы на поле графопроектировщика, составляет 4392 слов.

В результате компоновки создается загрузочный файл **DMMN.SAV** объемом 108 блоков. Файлы прямого доступа имеют объем, не превышающий 20 блоков. Объем оперативной памяти, требуемой для загрузки, включает 15022 слов.

Объем программных модулей представлен в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1  
Объем программных модулей

Тип файла	Спецификация файла	Объем файла (в блоках)
Объектные файлы	<b>PROEKH.OBJ</b>	33
	<b>RASCH1.OBJ</b>	92
	<b>DIALOG.OBJ</b>	47
	<b>UPCL.OBJ</b>	80
	<b>GRPOST.OBJ</b>	90
Загрузочный файл	<b>DMMN.SAV</b>	108
Информационные файлы	<b>Z3.DAT</b>	4
	<b>Z4.DAT</b>	4
	<b>Z7.DAT</b>	20
	<b>Z8.DAT</b>	12

Спецификация входного информационного массива, организованного из четырех файлов с прямым доступом, указана в табл. 1.2. Связь с входным информационным массивом обеспечивается операторами прямого доступа.

Техническое обеспечение использует стандартные вычислительные средства СЭМ: "Электроника 100-25" или КЭСТ-1016С, периферийные устройства - дисководы КЭСТ-1370 или ЕС-5061, печатающие устройства

Т а б л и ц а 1.2  
Размерность файлов прямого доступа

Спецификация файла	Логический номер	Количество записей	Максимальная длина записи (в словах)
<b>ZK3:Z3.DAT</b>	I2	4	120
<b>ZK3:Z4.DAT</b>	I3	4	100
<b>ZK3:Z7.DAT</b>	I1	8	320
<b>ZK3:Z8.DAT</b>	I4	6	240

СМ-6215 или **DZM-180**, графопроектировщик АР152, графический дисплей УПИ или ГРАДИТ, алфавитно-цифровой дисплей СМ1604 или ИБН30017.

Настройка программы на комплексе АРМ.

1. Включите ЭМ и периферийные устройства и убедитесь в готовности к работе комплекса АРМ. На пульте управления графопроектировщика должны быть включены кнопки "Вкл.", "Исходное положение", "Крепление бумаги". На пульте управления УПИ для работы в режиме связи с ЭМ должны быть нажаты клавиши "Сеть", "ЭМ". В случае отсутствия индикации на экране УПИ следует нажать клавишу "Экст. инд.". Если восстановление индикации не произошло, нажать клавиши "П.У" и "ЭМ".

2. На пульте управления наложите на магнитных лентах выключатели кнопки "Вкл.", "Загрузка", "Диспанс.".

3. Установите магнитную ленту с надписью **"ROLLIN R02 ВЕРСИЯ 01"** в накопитель на магнитной ленте **MTN**.

4. Установите диск **DKM** в накопитель на магнитных дисках, включите "Пуск". После загрузки диска надо отжать кнопку "Защита".

5. Загрузите центральный процессор системой, записанной на магнитной ленте, следующим образом:

- наберите на пульте машинный адрес **773000**;
- нажмите последовательно клавиши на пульте ЭМ "Стоп", "Занесение адреса", верните их в исходное положение, нажмите и отпустите клавишу "Пуск".

- вводите команду строку **MTN** При появлении знака (#) на экране дисплея введите команду строку

**DKM:/FORMAT<MTN:R02/F1**

форматирование диска произойдет за 1,5 мин. При этом на экране дисплея высветятся надписи



нажать клавишу "Рост. инд.", если восстановление не произошло, нажать клавишу "П.У." и начать работу сначала.

2. Сообщение  $\Delta$  А xxx свидетельствует о неготовности графопостроителя к работе, проверка графопостроителя на готовность осуществляется загрузкой системы командой 767770; при ответе E 0004000 графопостроитель к работе готов.

### 1.3. Руководство для программиста

#### Характеристики программы.

1. Временные характеристики: время компиляции 50 с; операционное время 30 с.
2. Режим работы - активный диалог с программой. После появления на экране дисплея надписи "PAUSE" следует нажать клавишу "BK". В дальнейшем правильность ввода исходных данных по участкам проверяется и в случае удовлетворительного ввода на вопрос  $\sqrt{N}$ ? следует нажать клавишу  $\sqrt{}$ , в противном случае - клавишу  $N$ , тогда программа самовосстанавливается и ввод может быть осуществлен заново. После появления на экране надписи "PAUSE 00004" осуществляется решение задачи, сопровождающееся выводом по желанию пользователя протокола расчета и результатов расчета в аналитической форме. После появления на экране надписи "PAUSE 55555" по желанию пользователя может быть сформировано изображение вакуумной схемы на экране графического дисплея, либо на поле графопостроителя.

Обращение к программе. Для выполнения задачи ввести команду строку  $KDMM$ .

В о д и с х о д н ы х д а н н ы х производится в интерактивном режиме с соответствующей формой представления числа; рабочее давление - в экспоненциальной форме, газовый поток - в экспоненциальной форме; характерный размер вакуумной камеры - в вещественной форме; длины соединительных трубопроводов - в вещественной форме; условный код типа вакуумного оборудования - целая величина.

Тип элементов вакуумной системы (ЭЭС) выбирается программой, при этом код ЭЭС - 21. Предусмотрена возможность задания типа ЭЭС условным кодом. Длину переходных трубопроводов задает пользователь, в противном случае вводится код "1" и программа задает длину 0,2 м.

Ввод исходных данных начинается с более высоковакуумной части системы и ведется последовательно по участкам.

Для вывода результатов расчета на экран дисплея коду клавиша  $KD$  приводить значение "0", на УПИ - "1", на графопостроитель - "2". Для вывода протокола работы программы на АЦДУ коду клавиша  $KD2$  приводить значение "1", в противном случае - "0".

В в о д р е з у л ь т а т о в р а с ч е т а осуществляется в аналитической форме на АЦДУ и в виде вакуумной схемы с перечислением типоразмеров ЭЭС и размеров переходных трубопроводов (м). Даются значения рабочего давления (Па), газового потока (м<sup>3</sup> Па/с), приведенных годовых народнохозяйственных затрат (руб/г). Марки ЭЭС приводятся в условных кодах.

Локальная база данных. Вакуумные системы проектирует на базе разработанного и выпускаемого оборудования. База данных содержит следующие технико-экономические характеристики для откатного оборудования: предельное остаточное давление, наибольшее выпускное давление, наибольшее давление запуска, быстродействие, диаметр выпускного патрубка, капитальные и эксплуатационные затраты; для коммутационной арматуры и лозулек: проводимость, диаметр условного прохода, стоимостные коэффициенты капитальных и эксплуатационных затрат. База данных организована в виде файлов прямого доступа и поэтому внесение изменений и дополнений в нее не требует изменений в прикладных программах. Технико-экономические характеристики вакуумного оборудования приняты в соответствии с промышленными каталогами и периодическими, по мере необходимости, в базу данных могут вноситься изменения. Состав первоначальной базы данных приведен в табл. 1.3 - 1.8, 1.10, 1.11, 2.2 - 2.10.

Т а б л и ц а 1.3

Виды откатного оборудования

Виды	Типоразмеры
Солотниковые, пластинчатые	ВН-46 I М; ВМ-20; МН-20С; ВПГ-5; МН-1
статорные, плужарные	МТ; МН-7; МН-01; МНЗ-300; МН-500
Пластинчатые-роторные	ВН-01; ВЕ-494; 2ШЕР-1Д; НВР-3Д; 2ШЕР-5Д
Двухроторные	ДНН-6-2; ДНН-50-2; ДНН-150-2; 2ДНН-500; 2ДНН-1500; ДНН-5000
Паромасляные	Н-0; П6-с; Н-1С-2; Н-3С-М; Н-2Т-3; Н-8Т-М; Н-40Т
Турбомолекулярные	ТМН-100; ТМН-200; ТМН-300; ТМН-500; ТМН-5000

Продолжение табл. I.3

Виды	Типоразмеры
Монно-геттерные	ГМН-0,5; ГМН-2; ГМН-5
Магнитогоразрядные	МГД-0,0063; МГД-0,025; МГД-0,063; МГД-0,1; МГД-0,25; МГД-0,68; МГД-1

Таблица I.4

Перечень коммутационной аппаратуры

Виды	Типоразмеры
Сверхвысоковакуумная	КРУТ-25; 40; 63; ЗНТ-100; 160; 250
Высоковакуумная	ВЭП-25; 63; 100; ЭВВ-100; 160; 250; 400; 630
Предохранительная	КВУ-25 л; КВМ-63

Таблица I.5

Виды ловушек

Виды	Типоразмеры
Азотные низко- вакуумные	ЛНВ-32; 63; 100; 160
Сорбционные	ДС-25; 32
Азотные высоко- вакуумные	ЛВАК-85; 100; 260; 380; 500

Таблица I.6

Стоимостные коэффициенты насосов

Коэффици- енты	Насосы						
	враща- тельные	двухро- торные	паро- струй- ные	4	5	6	7
I	3130	2120	260	4700	1680	4650	
Мн	0,5	0,427	0,478	0,1	0,9	0,206	

Продолжение табл. I.6

I	2	3	4	5	6	7
Вн	0,317	0,165	0,054	0,26	0,152	0,0316
Мн	0,5	0,451	0,33	0,11	0,517	0,417

Таблица I.7

Стоимостные коэффициенты ловушек

Коэффи- циенты	Азотная	Алюминиевая
Ал	100	558
Мл	0,2	0,25
Вл	0,034	0,006
Пл	0,2	0,16

Таблица I.8

Стоимостные коэффициенты ветворов

Коэффи- циенты	Ветвори низко- вакуумные	Ветвори высоко- вакуумные
Аз	125	2160
Мз	0,117	0,5
Вз	0,0008	0,0008
Пз	0,077	0,077

1.4. Руководство для оператора

Условия выполнения работ. Применение САПРПС предусмотрено на рабочем месте разработчика АРД.02/СМ или вычислительном комплексе ИЗОТ 10160 с использованием накопителя на магнитных дисках, накопителя на магнитных лентах, АЛУ. Для выполнения графической части работы применены графопостроитель, графический дисплей.

Все устройства, использование которых предполагается в работе программы, должны быть выключены и готовы к работе.

Выполнение программы. Программа позволяет рассчитать трехчастную систему, каждый участок состоит из последовательно соединенных элементов: насоса, ловушки, клапана 2, клапана 6, переходных трубопроводов (см. рис. 1.2).

Для выполнения программы следует привозить диск *RKN*; логическое имя *DK3* командой

*ASS RKN: DK3*

осуществить связь ЭВМ с графопостроителем или графическим дисплеем командой *LDXY* и командой *LOCP*. Запуск программы на выполнение производится командой *R DMM/M*. Дальнейшая работа с программой выполняется в диалоговом режиме. На экране дисплея появляются комментарии к программе по подготовке исходных данных и ввод исходных данных. После появления надписи, свидетельствующей о паузе, следует нажать клавишу "BK". Для выполнения расчета необходимо подготовить следующие исходные данные:

- 1) рабочее давление (Па), например, если рабочее давление  $1,75 \cdot 10^{-5}$  Па, то задать его в виде *1.75 E-05*;
- 2) газовый поток ( $\text{м}^3/\text{Па} \cdot \text{с}$ ), например, если газовый поток  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Па} \cdot \text{с}$ , то задать его в виде *1.5 E-03*;
- 3) характерный размер камеры (м), например, если размер камеры  $0,25$  м, то задать его в виде *0,25*;
- 4) длины трубопроводов (м), например, если длина  $0,65$  м, то задать в *0,65*, если длина не задана, то вводится значение "1" и программа принимает длину  $0,2$  м.

Дополнительно могут быть заданы элементы вакуумной системы в закодированном виде.

Элементы вакуумных систем (ЗЭС) вводятся условными кодами, приведенными в табл. 1.9.

Экран типов ЗЭС предусмотрен программой, при этом код вводится "1". Ввод исходных данных начинается с более высоковакуумного участка системы последовательно по участкам.

Для вывода результатов расчета на экран дисплея клавиша *K1* принимает значение "0", на УППМ - "1", на графопостроителе - "2".

Для вывода протокола работы программы на АЦПУ клавиша *K2* принимает значение "1", в противном случае - "0". После ввода каждого значения данных нажать клавишу "BK".

Т а б л и ц а 1.9

Коды элементов вакуумных систем

Элементы вакуумных систем	Код
Насосы	
золотинковые, пластинчато-статорные, плунжерные	2
пластинчато-роторные	3
двухроторные	4
паромасляные	5
турбомолекулярные	6
ионно-геттерные	7
магнетронразрядные	8
Коммутационная арматура	
низкововакуумная	2
высокововакуумная	3
сверхвысокововакуумная	4
Ловушки	
азотная низковакуумная	2
сорбционная	3
азотная высоковакуумная	4

При вводе данных правильность ввода проверяется по участкам, в случае удвоения второго ввода на вопрос (*Y/N?*) следует нажать клавишу (Y), в противном случае - клавишу (N), тогда программа само-восстанавливается на данном этапе и ввод осуществляется заново.

Результаты работы программы выводятся в аналитической форме после науки 00004, в виде вакуумной схемы - после науки 55555.

Вывод результатов производного расчета производится в алфавитно-цифровой форме на экран дисплея или АЦПУ и в виде вакуумной схемы на экран графического дисплея или графопостроителя (рис. 1.5), в зависимости от желания пользователя.

При предоставлении в алфавитно-цифровой форме результатов расположении матрицей из трех столбцов по максимальному количеству участников схемы, и четырех строк - по количеству элементов в каждом участ-  
ку.

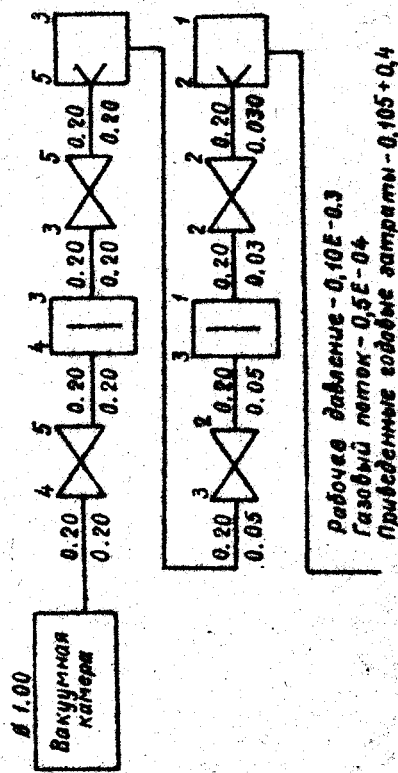


Рис. 1.5. Пример графического вывода принципиальных вакуумных схем

Газовый поток 0,50 Е-04 м<sup>3</sup>/с.

Рабочее давление 0,10 Е-03 Па.

Размер камеры 1,00 м.

Приведенные годовые затраты 0,105 + 04 руб/год.

Длина трубопроводов участков вакуумной системы:

0.200	0.200	0.000
0.200	0.200	0.000
0.200	0.200	0.000
0.200	0.200	0.000
0.200	0.500	0.000
0.200	0.500	0.000
0.200	0.030	0.000
0.200	0.030	0.000

Диаметры трубопроводов участков вакуумной системы:

5	2	0
4	3	0
4	3	0
3	2	0

Коды элементов вакуумной системы:

Таблица 1.10

Типоразмеры насосов

Тип насосов	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Пластичнато-старые зо-	ВН-61М	ВН-20	ВН-21С	ВН-6	ВН-1МТ	ВН-7	ВН-6Т	ВН-300	ВН-500
Потничные	ВН-01	ВН-194	ВН-11	ВН-21	ВН-61	-	-	-	-
Вакуумоторные	ВН-5-1	ВН-50	ВН-150-1	ВН-500	ВН-1500	ВН-5000	-	-	-
Вакуумосливные	В-0,15-С	В-10-2	В-50-1	В-21-3	В-11-1	В-401	-	-	-
Вакуумозаряд-	ВН-100	ВН-200	ВН-500	ВН-500	ВН-5000	-	-	-	-
Вакуумозаряд-	ВН-0,2М	ВН-2	ВН-6	-	-	-	-	-	-
Вакуумозаряд-	ВН-0,063	ВН-0,025	ВН-0,063	ВН-1	ВН-0,25	ВН-0,68	ВН-1	-	-

Типоразмеры ловушек и клапанов

Тип элемента	Ловушка азотная	Ловушка сорбционная	Ловушка азотная	Вискозавакuumная	Клапан низково-	Вакуумная	Клапан вискозная-	Вакуумный	Клапан сверхвискозно-	Вакуумный
1	ЛВ-32	ЛС-25	ЛВА-85	ЛВМ-164	ЛВМ-164	ЛВМ-100	ЛВМ-164	ЗПТ-100	ЗПТ-100	ЛВ16(АН)
2	ЛВ-63	ЛС-32	ЛВА-100	ЛВМ-254	ЛВМ-254	ЛВМ-100	ЛВМ-254	ЗПТ-160	ЗПТ-160	ЛВ40(АН)
3	ЛАС-100	-	ЛВА-260	ЛВМ-404	ЛВМ-404	ЛВА-260	ЛВМ-404	ЗПТ-250	ЗПТ-250	КВТ25-1
4	ЛАС-160	-	ЛВА-380	ЛВМ-634	ЛВМ-634	ЛВА-380	ЛВМ-634	ЗВБ-400	ЗВБ-400	КВТ50-1
5	-	-	ЛВА-500	-	-	ЛВА-500	-	ЗВБ-630	ЗВБ-630	КВТ100-1

Типы элементов вакуумной системы:

3	1	0
5	2	0
3	1	0
5	2	0

В первой матрице даны значения длины трубопроводов -  $l_1, l_2, l_3, l_4$ , во второй - диаметры трубопроводов, последовательно вниз по столбцу -  $d_1, d_2, d_3, d_4$ , (см. рис. I.2). В третьей матрице приведены коды элементов вакуумной системы. На первой строке обозначены коды насосов, на второй - ловушек, затем - коды первого и второго клапанов. Коды элементов приведены в табл. I.9.

Типы элементов вакуумной схемы представлены в четвертой матрице и расположены, как и коды элементов. Типы элементов обозначают типоразмер элемента. Матричный код соответствует порядковому номеру типоразмера соответствующих элементов, указанных в табл. I.10 и I.11.

При выводе результатов в форме схемы число, расположенное над линией трубопровода, означает длину трубопровода (м), под линией - диаметр (м). Цифра, расположенная над изображением элемента слева, означает вид элемента, соответствующий кодам, приведенным выше; справа - типоразмер элемента, указанный в табл. I.10 и I.11. На схеме также указаны исходные данные и технические условия для проектирования: диаметр вакуумной камеры, производительность газопроводящих и нагревательных элементов и приведенные народнохозяйственные затраты.

Сообщения оператору и их смысловое значение приведены в табл. I.12.

Таблица I.12  
Сообщения оператору

Сообщение	Значение
ERROR, охстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	В информационном массиве отсутствует вакуумный насос с требуемой охстротой действия
ERROR, низкое давление, Па	В информационном массиве отсутствует вакуумный насос с предельным остаточным давлением ниже требуемого

## 2. ПРОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

### 2.1. Стационарный режим работы

Задачей проверочного расчета является определение распределения давления в вакуумной системе по известным типам насосов, арматуры, трубопроводам, газоподделению материалов и технологическому газоподделению. Проверочный расчет выполняется для теоретического определения характеристик существующих вакуумных систем или уточнения проектных расчетов. Исходными данными являются:

- 1) вакуумная схема;
- 2) спецификация элементов вакуумной системы и их характеристики (в том числе откачиваемых объектов);
- 3) спецификация материалов, используемых в вакуумной системе, и их удельные газоподделения;
- 4) минимальный поток, регистрируемый течесчетчиком,  $Q_{Тн}$ ;
- 5) число проверяемых соединений  $M$ ;
- 6) технологическое газоподделение  $Q_T$ .

Проверочный расчет можно разделить на несколько этапов, выполняемых в следующей последовательности:

- 1) определение собственного газоподделения;
- 2) расчет распределения давления;
- 3) графическая проверка правильности выбора насосов;
- 4) проверка возможности запуска установки;
- 5) определение области совместной работы вакуумных насосов;
- 6) расчет времени работы форсгаллов.

В проверочном расчете можно более точно, чем в проективном, определить собственное газоподделение вакуумной системы. Оно складывается из газоподделения из конструктивных материалов  $Q_G$  и  $Q_H$  — утечки через оболочку вакуумной системы:

$$Q_c = Q_G + Q_H \quad (2.1)$$

Собственное газоподделение определяет предельно низкие давления, которые могут быть получены на вакуумной установке.

Газоподделение конструктивных материалов определяется по формуле

$$Q_G = \sum_{i=1}^n q_i \cdot F_i = q_{cp} \cdot \sum_{i=1}^n F_i \quad (2.2)$$

где  $q_i$  — удельное газоподделение материала;  $q_{cp}$  — среднее удельное газоподделение материалов вакуумной системы;  $F_i$  — площадь поверхности стенок камер и оснастки;

$$q_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2.3)$$

Для определения возможного нагнетания в вакуумную систему  $Q_H$  воспользуемся формулой

$$Q_H = K_B \cdot M \cdot Q_{Тн} \quad (2.4)$$

в которой  $K_B = 0,2$  — вероятность существования течи, меньшей чувствительности течесчетчика; число проверяемых соединений  $M$  и минимальный поток  $Q_{Тн}$  регистрируемый течесчетчиком, заданы в исходных данных. При расчете по формулам (2.2) и (2.4) следует определить удельное газоподделение и нагнетание арматуры, трубопроводов и откачиваемого объекта. Если для арматуры и трубопроводов они составят не более 20% от тех же величин для откачиваемого объекта, то их можно пренебречь, считая, что весь газ выделяется в откачиваемом объекте. В этом случае при расчете распределения давления по длине вакуумной системы можно рассматривать более простой случай вакуумной системы с сосредоточенными параметрами.

Общее газоподделение вакуумной системы в стационарном режиме работы

$$Q = Q_c + Q_T \quad (2.5)$$

Давление во входном сечении любого вакуумного насоса в соответствии с формулой (1.1)

$$P_{ni} = P_{pi} + \frac{Q}{S_{mi}} \quad (2.6)$$

где  $P_{pi}$  и  $S_{mi}$  — предельное давление и номинальная скорость откачки соответствующего насоса.

Повышение давления на последующих участках вакуумной системы можно определить из известных значений потока  $Q$  и проводимости  $K_k$  этого участка  $U_k$ :

$$(2.7)$$

$$\Delta P_k = Q / \zeta_k$$

В местах, где имеется сужения трубопроводов, наблюдается скачки давления

$$(2.8)$$

$$\Delta P_j = Q / \zeta_{ej}$$

где  $\zeta_{ej}$  - проводимость  $j$ -отверстия.

Давления в граничных сечениях между элементами вакуумной системы можно рассчитывать по формуле

$$(2.9)$$

$$P_{ik} = P_{pi} + \frac{Q}{S_{mi}} + \frac{Q}{\zeta_{ik}}$$

Предельное давление  $P_{pi}$  может уменьшаться только на ловушке. Второе слагаемое в (2.9) постоянно, а третье - только возрастает. На ловушке возможно как увеличение, так и снижение давления в зависимости от того, какое из слагаемых (2.9) будет вносить наиболее существенный вклад в изменение давления. Примерный график распределения давления между насосом и откачиваемым объектом показан на рис. 2.1.

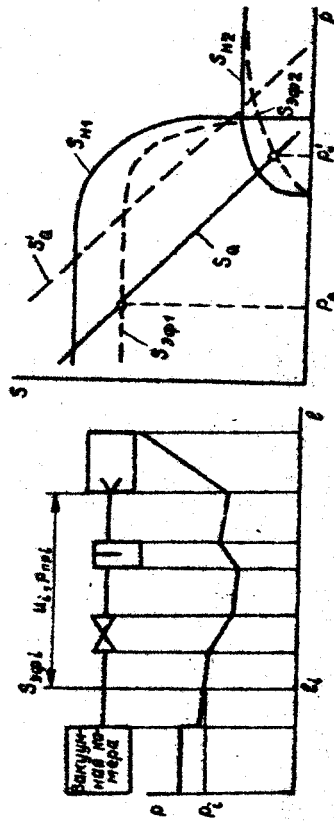


Рис. 2.1. Распределение давления в вакуумной системе

Рис. 2.2. Графическая проверка совместности работы двух насосов при постоянном потоке

Полученные расчетные точки соединены прямой линией, что соответствует реальному распределению давлений в молекулярном режиме течения газа. В других режимах такой график можно рассматривать как упрощенный.

Графическая проверка выбора вакуумных насосов приведена на рис. 2.2. По характеристикам выбранных насосов отроятся их эффективные скорости откачки: для первого насоса - в откачиваемом объекте, для второго - на выходе первого насоса и т.д. в соответствии с формулой

$$S_i = \frac{S_H \cdot \zeta_i}{S_H + \zeta_i} \quad (2.10)$$

где  $\zeta_i$  - проводимость вакуумной системы от насоса до  $i$ -го сечения. Пересечение этих кривых с кривой скорости откачки и газовой деления  $S_Q = Q/P$  определяет рабочие давления всех насосов.

Возможность запуска установки проверяется по графику рис. 2.2. Запуск установки возможен, если при всех давлениях, выше рабочего, в откачиваемом объекте скорости газовой деления и откачки меньше, чем эффективная скорость откачки насосов.

При расчетах по формуле (2.10) следует иметь в виду, что проводимость  $\zeta$  в общем случае является функцией давления.

Здесь же отроят значения скорости откачки и газовой деления  $S_Q = Q/P$ . Точка пересечения кривых  $S_{sp1}$  и  $S_Q$  соответствует установленному режиму работы первого насоса.

Давление в точке пересечения должно быть равно рабочему давлению первого насоса  $P_1$ . Аналогично по пересечению кривых  $S_{sp2}$  и  $S_Q$  можно найти рабочее давление второго насоса  $P_2$ . Если  $P_1$  меньше, чем максимальное выходящее давление  $P_{M1}$ , то насос работает совместно.

Из рис. 2.2 легко определить возможность запуска системы. Условием запуска системы можно считать то, чтобы в месте двойного пересечения кривых  $S_Q$  и  $S_{sp1}$  в промежутке давлений от  $P_A$  до  $P_1$ . В противном случае, как это видно из рис. 2.2, для  $S_Q$  запуск системы невозможен.

В установках с переменным газовойделением к натеканию принадлежит интерес нахождения области их совместной работы на кривой  $Q = f(P)$ . Проверку совместности работы насосов удобно делать графиком -

чески (рис. 2.3), считая, что выполняется условие схожести потока

$Q_1 = Q_2$ , где  $Q_1$  - производительность откачки первой камеры;  $Q_2$  - производительность откачки второй камеры в течение выхлопного патрубке первого насоса.

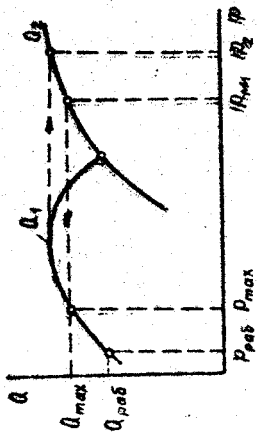


Рис. 2.3. Графическая проверка совместности работы двух насосов при различных величинах потерь

Значения  $Q_1$  и  $Q_2$  в функции давления можно рассчитать, воспользовавшись кривыми эффективности быстрой откачки насосов  $S_{эф1}$  и  $S_{эф2}$  (рис. 2.2) по формулам  $Q_1 = S_{эф1} \cdot P$ ;  $Q_2 = S_{эф2} \cdot P$ .

Если при максимальной производительности предыдущего насоса последующий обеспечивает на его выхлопном патрубке давление, меньше максимально допустимого выхлопного давления предыдущего насоса, то она всегда будет совместна.

Давление  $P_2$ , соответствующее максимальной производительности системы, находится из уравнения  $(Q_1)_{max} = Q_2(P)$ , которое удобно решить графически, проводя на рис. 2.3 прямую, параллельную оси  $P$  (показана стрелками), от максимума кривой  $Q_2(P)$  до пересечения с кривой  $Q_1(P)$ . Точка пересечения прямой с  $Q_2(P)$  определяет значение  $P_2$ .

Если  $P_2 < P_{м1}$  ( $P_{м1}$  - максимально допустимое давление на выходе первого насоса), то обеспечена полная совместность работы насосов. При  $P_2 > P_{м1}$  совместность работы насосов сохраняется только в диапазоне давлений от  $P_{вс}$  до  $P_{м1}$  и потоков от  $Q_{вс}$  до  $Q_{м1}$ . Нахождение  $Q_{м1}$  и  $P_{м1}$  производится обратным построением, показанным на рис. 2.3, начиная от давления  $P_{м1}$ .

Если при ограниченной совместности работы насосов в откачной камере объем суммарный поток превышает  $Q_{м1}$ , то в вакуумной камере произойдет резкое повышение давления от  $P_{м1}$  до  $P_{м2}$ . Отношение  $P_{м2}/P_{м1}$  может составлять несколько порядков.

В вакуумных системах с устойчивыми газовыделением можно ограничиться обеспечением частичной совместности работы насосов, что во многих случаях, особенно в сверхвысоковакуумных установках, позволяет существенно понизить требования к насосу предварительного разряда. Улучшить экономические характеристики и удобство эксплуатации вакуумной установки. В вакуумных системах с переменным газовыделением, например, в вакуумной металлургии, необходимо обеспечивать полную совместность работы насосов.

При последовательном соединении вакуумных насосов между ними часто устанавливаются дополнительные откачиваемые объекты, называемые форвакуумными объектами. Они позволяют во время работы установок выключать на длительный период насос предварительного разряда. Поток газа, откачиваемый высоковакуумным насосом, попадает в форбаллон и увеличивает давление в нем от минимального  $P_H$ , которое достигается при работе форвакуумного насоса, до максимального  $P_K$ , соответствующего к максимальному выхлопному давлению высоковакуумного насоса. Промежуток времени, в течение которого вакуумная система работает на форбаллоне и может быть отключен форвакуумный насос, удобно выбирать равным времени стационарного режима работы установок.

Если весь поток газа, проходящий через высоковакуумный насос, идет на повышение давления в форбаллоне, то можно записать уравнение сохранения массы  $Q \cdot t' = V_{фр}(P_K - P_H)$ , где  $V_{фр}$  - объем форбаллона;  $t'$  - время работы после отключения форвакуумного насоса. Объем форбаллона из полученного уравнения

$$V_{фр} = \frac{Q \cdot t'}{P_K - P_H} \quad (2.11)$$

Здесь  $P_K = (0.3-0.5) P_B$ ;  $P_H = \frac{Q}{S_{н.кн}}$ , где  $P_B$  - максимальное выхлопное давление высоковакуумного насоса;  $S_{н.кн}$  - скорость откачки форвакуумного насоса;  $K_H$  - коэффициент использования вместительного насоса при откачке форбаллона до давления  $P_H$ .

Если в форбаллоне расположить адсорбент, количество поглощенного газа в котором  $A = K_T \cdot P \cdot G$ , где  $G$  - вес адсорбента, кг;  $P$  - давление, Па;  $A$  - количество поглощенного газа, м<sup>3</sup> Па;  $K_T$  - коэффициент адсорбции при температуре  $T$  м<sup>3</sup>/кг (для активированного угля



СКОЕ  $K_{293} = 0,1 - 1,0$ ;  $K_{77} = 10^3 - 10^4$ , то уравнение для расчета форбаллона с адсорбентом запишется в таком виде:

$$Q t'' = V_{\text{Ф}}(P_k - P_H) + K_{77}(P_k - P_H),$$

откуда

$$V_{\text{Ф}} = \frac{Q t'' - K_{77} \cdot \epsilon (P_k - P_H)}{P_k - P_H}, \quad (2.12)$$

где  $t''$  - время работы форбаллона с адсорбентом.

Если весь форбаллон заполнен адсорбентом, то  $\epsilon = V_{\text{Ф}} \cdot d$ , где  $d$  - насыщенный вес адсорбента. С учетом пористости адсорбента  $\epsilon$  объем форбаллона рассчитывается из уравнения

$$Q t'' = \epsilon \cdot V_{\text{Ф}} \cdot (P_k - P_H) + K_{77} \cdot V_{\text{Ф}} \cdot d \cdot (P_k - P_H),$$

откуда

$$V_{\text{Ф}} = \frac{Q \cdot t''}{(P_k - P_H) (K_{77} \cdot d + \epsilon)}. \quad (2.13)$$

Время работы форбаллона без адсорбента можно определить, воспользовавшись формулой (2.11)

$$t' = \frac{(0,5 \cdot P_k \cdot S_H \cdot K_H - Q) \cdot V_{\text{Ф}}}{Q \cdot S_H \cdot K_H}. \quad (2.14)$$

Если форбаллон полностью заполнен адсорбентом, то из (2.13) получим время работы форбаллона

$$t'' = \frac{(0,5 \cdot P_k - Q) / (S_H \cdot K_H) + (K_{77} \cdot d + \epsilon) \cdot V_{\text{Ф}}}{Q}. \quad (2.15)$$

Из уравнений (2.11) и (2.13) можно определить, во сколько раз увеличится продолжительность работы форбаллона при его заполнении адсорбентом  $t''/t' = K_{77} \cdot d + \epsilon$ , где  $t'$  и  $t''$  - соответственно время работы форбаллона с адсорбентом и без адсорбента. Для  $T = 293 \text{ K}$   $K_{77} = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\epsilon = 0,5$ ,  $t''/t' = 7 \cdot 10^2$ . Для  $T = 77 \text{ K}$   $K_{77} = 10^3 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\epsilon = 0,5$ ,  $d = 7 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$ ,  $t''/t' = 7 \cdot 10^6$ .

Таким образом, применение адсорбента в форбаллоне для комнатной температуры уменьшает требуемую величину его объема в  $10^2$  раз, а для

температуры жидкого азота -  $10^6$  раз. Для всех вакуумных систем с последовательно включенными насосами необходимо рассчитывать размеры форбаллона.

## 2.2. Нестационарный режим работы

Проверочный расчет вакуумной системы в нестационарном режиме работы с целью определения времени откачки выполняется для вакуумных систем, спроектированных из условий стационарного режима работы. Будем считать, что течение газа по вакуумной системе происходит изо-термически:

$$P \cdot V = \text{const}. \quad (2.16)$$

Продифференцировав это равенство, поделив на  $dt$  и проинтегрировав в пределах от  $t_1$  до  $t_2$ , получим

$$t = -V \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{S_{\text{ЭФ}} \cdot P}, \quad (2.17)$$

где  $t$  - время неустановившегося режима;  $P_1$  и  $P_2$  - давление в начале и конце неустановившегося режима откачки;  $P$  - текущее давление;  $V$  - объем объекта.

В общем случае эффективная скорость откачки объекта определя-

$$S_{\text{ЭФ}} = S_H \cdot K_H = \frac{Q}{P}, \quad (2.18)$$

где  $S_H$  - скорость откачки насоса;  $K_H$  - коэффициент использования насоса;  $K_H = \frac{U}{S_H + U}$ ;  $U$  - проводимость между насосом и откачиваемым объектом;  $P$  - текущее давление;  $Q$  - суммарное газоподделение и натекание.

В частном случае, когда  $S_{\text{ЭФ}} = \text{const}$ ,  $S_H = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ ,  $Q = 0$  (молекулярный режим течения газа по трубопроводу), из уравнения (2.17) получим

$$t = 2,3 \frac{V}{S_H \cdot K_H} \cdot \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.19)$$

В общем случае, когда упрощения неопустимы и  $Q$  нельзя считать равным нулю, необходимо пользоваться графоаналитическим методом расчета времени откачки. Построим графики эффективной производительности откачных вакуумных насосов в отнормированном объеме  $S_{эф} = f_i(p)$  и скорости газовой выделенности и утечки, что (рис. 2.4), предполагает, что в вакуумной системе имеются три последовательно работающих насоса.

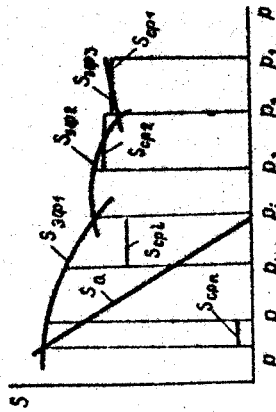


Рис. 2.4. Графоаналитический расчет времени откачки

Разобьем весь диапазон давлений от атмосферного до расчетного на несколько участков, в каждом из которых определим среднюю величину

$$S_{эф i} = \frac{(S_{эф i-1} - S_{эф i}) + (S_{эф i} - S_{эф i+1})}{2} \quad (2.20)$$

Время откачки в этом случае может быть рассчитано по формуле (2.19), применение которой на всех участках дает

$$\Delta t = 2,3 V \left( \frac{1}{S_{эф 1}} \lg \frac{P_1}{P_2} + \dots + \frac{1}{S_{эф i}} \lg \frac{P_i}{P_{i+1}} + \dots + \frac{1}{S_{эф n}} \lg \frac{P_n}{P_{n+1}} \right) \quad (2.21)$$

где  $n$  — число участков, на котором разбит весь диапазон изменения давлений в установке.

### 2.3. Пример проверочного расчета вакуумной системы

Исходные данные для проверочного расчета вакуумной системы представлены в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Исходные данные								
$d$	$e$	$q_1$	$F_0$	$q_2$	$Q_T$	$dT/dt$	$Q_{TH}$	$m$
1,0	2,0	$10^{-7}$	1	$10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	0,5	$10^{-10}$	10

Здесь  $d, e$  — размеры вакуумной камеры, м;  $q_1$  — газонаполнение материала вакуумной камеры,  $\text{м}^3 \text{Па}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $F_0$  — поверхность внутрикамерной оснастки,  $\text{м}^2$ ;  $q_2$  — газонаполнение материалов оснастки,  $\text{м}^3 \text{Па}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $Q_T$  — технологическое газонаполнение,  $\text{м}^3 \text{Па}/\text{с}$ ;  $dT/dt$  — соотношение между диаметром и длиной трубопроводов;  $Q_{TH}$  — минимальный поток, регистрируемый теплокатодом,  $\text{м}^3 \text{Па}/\text{с}$ ;  $m$  — число одновременно проводимых соединений.

Определение суммарного газонаполнения и утечки в вакуумной камере. На основании исходных данных определим  $Q$

$$Q = Q_T + q_1 + q_2 = Q_T + q_1 F_{кач} + q_2 F_0 + K_B \cdot m \cdot Q_{TH} =$$

$$= 5 \cdot 10^{-5} + 10^{-7} (2 \cdot 0,8 \cdot 1 + 3,14 \cdot 1 \cdot 2) + 10^{-6} \cdot 1 + 0,2 \cdot 10 \cdot 10^{-10} =$$

$$= 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \text{Па}/\text{с}.$$

Перечень выбранных ЭМ элементов вакуумной системы. По результатам автоматизированного проекторного расчета, представленного в аналитической и графической формах (рис. 1.5) и на основании табл. 1.9 — 1.11, 2.2 — 2.10, перечислим выбранные ЭМ элементы вакуумной системы. Для I участка — насос (5,3) паромасляный — Н-50-М ( $S_H = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $P_{пред} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ); ловушка (4,5) высоковакуумная, сорбционная ЛВАК-260 ( $U_A = 1,46 \text{ м}^3/\text{с}$ ); затвор (4,5) сверхвысоковакуумный ЭВЗ-160 ( $U_3 = 3,34 \text{ м}^3/\text{с}$ ); затвор (3,5) высоковакуумный ЭВЗ-160 ( $U_3 = 3,34 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Для II участка — насос (2,1) механический ВМ461М ( $S_H = 0,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $P_{пред} = 3 \text{ Па}$ ); ловушка (3,1) ЛВАК-85 ( $U_A = 0,13 \text{ м}^3/\text{с}$ ); клапан (3,2) низковакуумный ВЗЛ-63 ( $U_3 = 0,0148 \text{ м}^3/\text{с}$ ); клапан (2,2) низковакуумный ВЗЛ-63 ( $U_3 = 0,0148 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Расчет распределения давления по длине I-го участка (рис. 2.5). Определим режим течения газа на участке по числу Кнудсена  $Kn = \lambda/D$ , где  $\lambda = 4,702 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  — длина свободного пробега;  $D$  — диаметр трубопровода; при  $Kn > 1,5$  — режим молекулярный,  $K_n < 10^{-3}$  — вязкостный;

Таблица 2.2

## Золотниковые и пластинчато-статорные насосы

Основные характеристики	ЗН-46ЛМ	РЕН-20	ВЛ-2МГ	НВГ-5	ВН-1МГ	ВН-7	ВН-6Г	ВЗ-300	ВЗ-500
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	0,3	0,5
Предельное остаточное давление, Па	3	3	3	0,5	3	5	5	5	5
Стоимость насоса, руб	90	160	240	246	420	760	1252	1714	2210
Эксплуатационные расходы, руб/ч	$8,85 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$2,43 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	0,128	0,17	0,22
Давление запуска, Па	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$
Диаметр входного патрубка, м	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,15	0,2	0,25
Диаметр выходного патрубка, м	$10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Выпускное давление, Па	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$

Таблица 2.3

## Характеристики пластинчато-роторных насосов

Основные характеристики	ВН-01	ВН-494	2НВР-1Д	НВР-3Д	2НВР-5Д
	1	2	3	4	5
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Предельное остаточное давление, Па	3	2	0,5	$3 \cdot 10^{-3}$	0,2
Стоимость насоса, руб	32	46	100	170	220
Эксплуатационные расходы, руб/ч	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$4,75 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$2,26 \cdot 10^{-2}$
Давление запуска, Па	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$
Диаметр входного патрубка, м	0,008	0,014	0,016	0,025	0,025
Диаметр выходного патрубка, м	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Выпускное давление, Па	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$

Характеристики турбомолекулярных насосов

Основные характеристики	ТМН-100	ТМН-200	ТМН-200	ТВН-500	ТМН-5000
	1	2	3	4	5
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	0,1	0,2	0,25	0,5	5
Предельное остаточное давление, Па	10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>
Стоимость насоса, руб	3700	4000	4090	4400	5520
Эксплуатационные расходы, руб/ч	0,2	0,21	0,22	2,4	0,31
Давление запуска, Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Диаметр входного патрубка, м	0,125	0,16	0,16	0,26	0,5
Диаметр выходного патрубка, м	0,032	0,05	0,05	0,05	0,1
Наибольшее выпускное давление, Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 2.7

Характеристики магнитоэридных насосов

Основные характеристики	НМД-6,3	НМД-25	НМД-63	НМД-100	НМД-250	НМД-680	НМД-1000
	1	2	3	4	5	6	7
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	6·10 <sup>-3</sup>	2,2·10 <sup>-2</sup>	6·10 <sup>-2</sup>	0,11	0,25	0,65	1,2
Предельное остаточное давление, Па	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>	5·10 <sup>-8</sup>
Стоимость насоса, руб	1620	2170	2650	3000	3500	4270	4820
Эксплуатационные расходы, руб/ч	0,0037	6,4·10 <sup>-3</sup>	0,01	1,2·10 <sup>-2</sup>	1,8·10 <sup>-2</sup>	2,8·10 <sup>-2</sup>	6,3·10 <sup>-2</sup>
Давление запуска, Па	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Диаметр входного патрубка, м	0,025	0,1	0,1	0,16	0,16	0,25	0,25
Диаметр выходного патрубка, м	-	-	-	-	-	-	-
Выпускное давление, Па	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2.8

## Характеристики геттерно-ионных насосов

Основные характеристики	ГИН-0,5МІ	ГИН-2	ГИН-5
	1	2	3
Быстрота откачки, м <sup>3</sup> /с	0,45	1,8	4,5
Предельное остаточное давление, Па	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Стоимость насоса, руб	820	2850	6500
Эксплуатационные расходы, руб/ч	0,1	0,2	0,33
Давление запуска, Па	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Диаметр входного патрубка, м	0,16	0,26	0,5
Диаметр выходного патрубка, м	-	-	-
Выпускное давление, Па	-	-	-

Таблица 2.9

## Характеристики электромеханических затворов

Основные характеристики	ВЭП-25	ВЭП-63	ВЭП-100	ЗВЭ-100	ЗВЭ-160	ЗВЭ-250	ЗВЭ-400	ЗВЭ-630
	1	2	3	4	5	6	7	8
Проводимость, м <sup>3</sup> /с	0,0142	0,0148	0,470	1,20	3,340	13,4	46,25	96,52
Диаметр условного прохода, м	25	0,063	0,100	0,1	0,16	0,25	0,4	0,63
Стоимость, руб	150	170	190	320	400	525	780	1610
Эксплуатационные расходы, руб/ч	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

Основная характеристика	ЛВАБ-85	ЛВАБ-100	ЛВАБ-260	ЛВАБ-380	ЛВАБ-500
Производительность, м <sup>3</sup> /с	0,13	0,31	1,46	2,84	6,1
Диаметр условного прохода, м	0,085	0,1	0,26	0,38	0,5
Статическое давление, Па	150	170	200	230	250
Секционная производительность, м <sup>3</sup> /ч	2,1·10 <sup>3</sup>	2,4·10 <sup>3</sup>	2,5·10 <sup>3</sup>	2,8·10 <sup>3</sup>	2,9·10 <sup>3</sup>

Характеристики азотохлаждающих ловушек

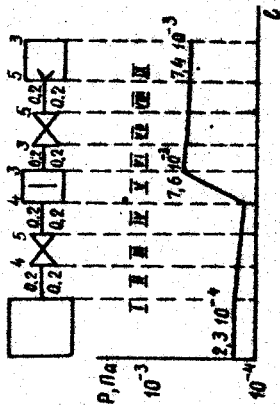


Рис. 2.5. Распределение давления на I участке

$$K_{\text{п}} = \frac{4.702 \cdot 10^{-3}}{10^{-4} \cdot 0.2} = 235,1 \text{ л/с.}$$

Определим проводимость элементов для молекулярного режима (воздух 293 К):

$$U_{11} = U_{\text{отс}} = 116 F =$$

$$= 116 \frac{2,14 \cdot 0,04}{4} = 3,64 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{12} = U_{\text{труб}} = 121 \frac{d^3}{e^3} = 121 \frac{0,008}{0,2^3} = 4,84 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{13} = 3,34 \text{ м}^3/\text{с}; U_{14} = 4,84 \text{ м}^3/\text{с}; U_{15} = 1,46 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{16} = 4,84 \text{ м}^3/\text{с}; U_{17} = 3,34 \text{ м}^3/\text{с}; U_{18} = 4,84 \text{ м}^3/\text{с}; U_{19} = \infty.$$

Найдем общую проводимость всего участка

$$\frac{1}{U_{\text{общ}}} = \frac{1}{U_{11}} + \frac{1}{U_{12}} + \dots + \frac{1}{U_{19}} = 2,384;$$

$$U_{\text{общ}} = 0,419 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Рабочее давление в камере будет

$$P_{\text{раб}} = \frac{Q}{S_{\text{эгр}}} + P_{\text{пред}} = \frac{Q_c}{S_{\text{H1}} + U_{\text{общ1}}} + P_{\text{пред}} =$$

$$= \frac{5,2 \cdot 10^{-5}}{0,5 \cdot 0,419} + 3 \cdot 10^{-6} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

Предельное давление  $P_{\text{пред}}$  взято с учетом понижения давления на ловушке в 10 раз.

Определим давление на границе между I и II элементом I участка:

$$P_1' = \frac{Q}{S_{\text{зп1}}} + P_{\text{прзп1}};$$

$$S_{\text{зп1}} = \frac{S_{\text{нл}} U_{\text{сг}}}{S_{\text{нл}} + U_{\text{сг}}}; \frac{1}{U_{\text{сг}}} = \frac{1}{U_{12}} + \frac{1}{U_{13}} + \dots + \frac{1}{U_{19}} = 2,11;$$

$$U_{\text{сг}} = 0,474 \text{ м}^3/\text{с}; S_{\text{зп1}} = 0,243 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$P_1' = \frac{52 \cdot 10^{-5}}{0,243} + 3 \cdot 10^{-6} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

Давление на границе между II и III элементом

$$P_2'' = \frac{5,2 \cdot 10^{-5}}{0,256} + 3 \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ Па.}$$

Аналогично подсчитаны давления на границах между другими элементами. Результаты сводим в табл. 2.11 и строим график распределения давления по длине I участка (рис. 2.5).

Расчет распределения давления по длине II участка. Определим режим течения газа

$$Kn = \frac{4,702 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,05} = 0,31,$$

так как  $5 \cdot 10^{-3} < Kn < 1,5$ , режим течения молекулярно-вязкотный. Сопроотивлением отверстий при небольшом перепаде давления, характерном для установившегося режима, в вязкотном и молекулярно-вязкотном режимах можно пренебречь, поэтому  $U_{21} = U_{29} = \infty$ .

Определим проводимость других элементов участка:

$$U_{22} = U_{\text{труб}} = 121 \frac{\text{д}^3}{\text{с}} \gamma,$$

где  $\gamma$  - коэффициент, который берется из табл. 3.7/3/;

$$U_{22} = 121 \frac{125 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot 6,43 = 0,48 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{23} = 0,0148 \text{ м}^3/\text{с}; U_{24} = 0,48 \text{ м}^3/\text{с}; U_{25} = 0,13 \text{ м}^3/\text{с};$$

Таблица 2.11

Характеристики вакуумной системы на I участке

Номер элемента	Название элемента	$U, \text{м}^3/\text{с}$	$d, \text{м}$	$L, \text{м}$	$U, \text{м}^3/\text{с}$	$U_{\text{сг}}, \text{м}^3/\text{с}$	$P_{\text{прзп}}, \text{Па}$	$P_1', \text{Па}$	$P_2'', \text{Па}$
I	Отверстие у объекта	3,64	0,2	-	-	0,474	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
II	Трубопровод	4,84	0,2	0,2	0,2	0,525	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$
III	Запор	3,34	-	-	0,525	0,623	$3 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
IV	Трубопровод	4,84	0,2	0,2	0,623	0,714	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
V	Ловушка	1,46	-	-	0,714	1,396	$3 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$
VI	Трубопровод	4,84	0,2	0,2	1,396	1,964	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
VII	Запор	3,34	-	-	1,964	4,761	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
VIII	Трубопровод	4,84	0,2	0,2	4,761	-	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$
IX	Отверстие насоса	-	-	-	-	-	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$

$$U_{26} = 121 \frac{27 \cdot 10^{-6}}{0,2} \cdot 4,18 = 0,068 \text{ м}^3/\text{с}; U_{27} = 0,0148 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{28} = 0,068 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Найдем общую проводимость всего участка:

$$\frac{1}{U_{общ2}} = \frac{1}{0,48} + \frac{1}{0,0148} + \frac{1}{0,46} + \frac{1}{0,13} + \frac{1}{0,068} + \frac{1}{0,0148} + \frac{1}{0,068};$$

$$U_{общ2} = 0,0056 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Давление у выхлопного патрубка пароструйного насоса

$$P_2 = \frac{Q_c}{S_{np2}} + P_{np2} = \frac{5,2 \cdot 10^{-5}}{0,78 \cdot 10^{-3}} + 0,3 = 0,38 \text{ Па}.$$

Определим давление на границе между I и II элементами II участка:

$$P'_2 = \frac{Q_c}{S_{np2}} + P_{np2};$$

$$S_{np2} = \frac{0,78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,57 \cdot 10^{-2}}{0,78 \cdot 10^{-3} + 0,57 \cdot 10^{-2}} = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$P_2 = \frac{5,2 \cdot 10^{-5}}{0,68 \cdot 10^{-3}} + 0,3 = 0,37 \text{ Па}.$$

Результаты расчетов для других сечений II участка сводим в табл. 2.12 и строим график распределения давления (рис. 2.6).

Графическая проверка выбора вакуумных насосов и определение совместности их работы. Для графической проверки правильности выбора вакуумных насосов построим в логарифмических координатах зависимость

Номер элемента	Название элемента	$l, \text{ м}^3/\text{с}$	$d, \text{ м}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$U, \text{ м}^3/\text{с}$	$P, \text{ Па}$	$P_{np}, \text{ Па}$	$U_{np}, \text{ м}^3/\text{с}$	$U_{общ}, \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{общ}, \text{ Па}$
I	Отверстие	-	-	0,05	-	-	-	-	0,3	0,38
II	Трубопровод	0,48	-	0,05	0,57 · 10 <sup>-2</sup>	0,3	0,37	0,37	0,3	0,37
III	Запор	1,4 · 10 <sup>-3</sup>	-	-	0,57 · 10 <sup>-2</sup>	0,3	0,37	0,36	0,3	0,36
IV	Трубопровод	0,48	-	0,2	0,93 · 10 <sup>-2</sup>	0,3	0,37	0,34	0,3	0,34
V	Ковышка	0,13	-	-	0,1 · 10 <sup>-1</sup>	0,3	0,37	0,3	0,3	0,3
VI	Трубопровод	6,8 · 10 <sup>-3</sup>	-	0,2	0,1 · 10 <sup>-1</sup>	0,3	0,37	0,3	0,3	0,3
VII	Запор	1,4 · 10 <sup>-3</sup>	-	-	0,7 · 10 <sup>-1</sup>	0,3	0,37	0,3	0,3	0,3
VIII	Трубопровод	6,8 · 10 <sup>-3</sup>	-	0,03	0,6 · 10 <sup>-1</sup>	0,3	0,37	0,3	0,3	0,3
IX	Отверстие насоса	-	1,4 · 10 <sup>-2</sup>	0,2	0,7 · 10 <sup>-1</sup>	0,3	0,37	0,3	0,3	0,3

Таблица 2.12 Характеристики вакуумной системы на II участке

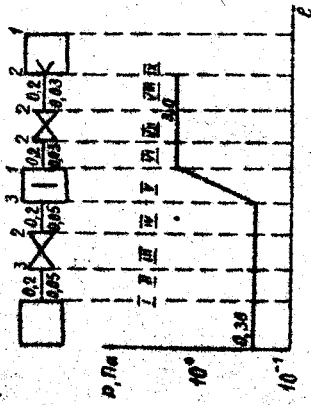


Рис. 2.6. Распределение давления на II участке



$S_H = f(p)$  для выбранных насосов [4], эффективную быстроту откачки  $S_{эф}$ , производительность откачки  $Q = S_{эф} \cdot p$ , скорость нагнетания и газотделения  $S_G$  для каждого из участков (рис. 2.7).

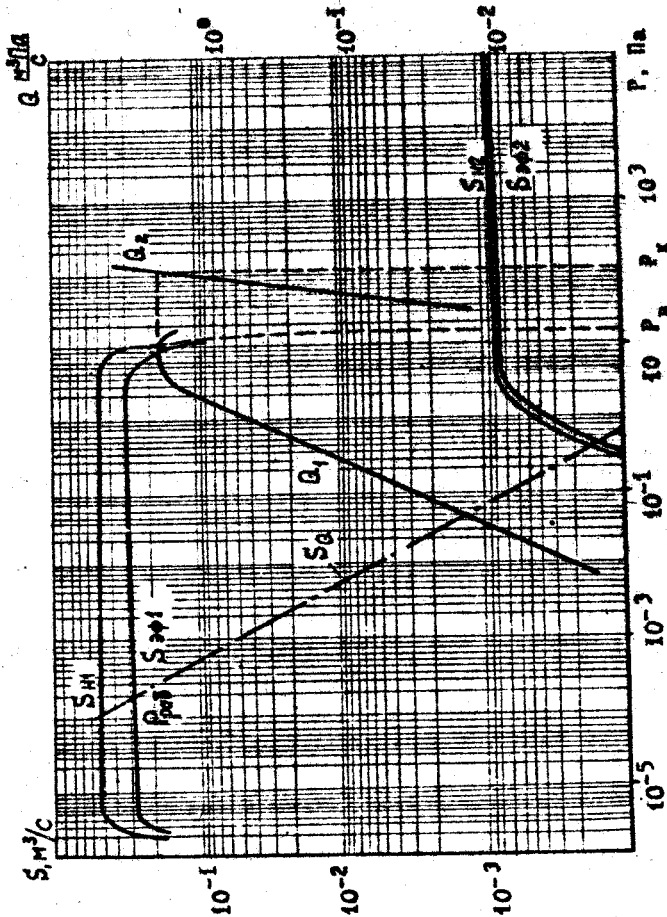


Рис. 2.7. Графическая проверка выбора насосов и совместности их работы

В табл. 2.13 вносим все расчетные характеристики при различных режимах течения газа. Общая производительность каждого участка при всех режимах течения газа рассчитывается в соответствии с методикой, изложенной в [1]. Эффективная быстрота откачки рассчитывается по формуле (2.10), производительность откачки  $Q = S_{эф} \cdot p$ , скорость нагнетания и газотделения  $S_G = \frac{Q}{p}$ . Точка пересечения  $S_{эф}$  и  $S_G$  соответствует установившемуся давлению  $p_{рас} = 2,3 \cdot 10^{-4}$  Па, а точка пе-

Таблица 2.13  
Эффективная быстрота и производительность откачки насосов при различных режимах

Тип насоса	Давление, Па	Быстрота откачки $S_H$ , м³/с	Производительность $Q$ , м³/с	Эффективная быстрота откачки от- носительно $S_{эф}$ , %	Производительность $Q$ , м³ Па/с	Резим течения
H-50-M	$2 \cdot 10^{-6}$	0	0,474	0	0	Молекулярный
H-50-M	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5	0,474	0,243	$2,4 \cdot 10^{-6}$	То же
H-50-M	$5 \cdot 10^{-3}$	0,5	0,474	0,243	$1,2 \cdot 10^{-5}$	"
H-50-M	$1 \cdot 10^{-2}$	0,5	0,474	0,243	$2,4 \cdot 10^{-5}$	"
H-50-M	$1 \cdot 10^{-1}$	0,5	0,592	0,271	$2,7 \cdot 10^{-2}$	Вязкоупруго- вязкостный
H-50-M	1	0,5	1,8	0,391	$3,9 \cdot 10^{-1}$	То же
H-50-M	$1 \cdot 10^1$	0,2	14,7	0,197	1,9	"
H-50-M	$1,5 \cdot 10^1$	0,01	21	0,01	$1,5 \cdot 10^{-2}$	"
H-461M	$5 \cdot 10^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,56 \cdot 10^{-2}$	$0,19 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$	"
H-461M	$2 \cdot 10^1$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$0,56 \cdot 10^{-2}$	$0,72 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	"
H-461M	$1 \cdot 10^2$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-1}$	Вязкостный
H-461M	$1 \cdot 10^3$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	0,78	То же
H-461M	$1 \cdot 10^4$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	0,7	$0,78 \cdot 10^{-3}$	7,8	"
H-461M	$1 \cdot 10^5$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	3,5	$0,78 \cdot 10^{-3}$	78	"

расчетной  $S_{\text{эф}}$  и  $P_{\text{ад}}$  - давлением  $P_{\text{ад}2} = 5 \cdot 10^{-1}$  Па. Так как  $R > P_{\text{ад}}$  Па  $> P_{\text{ад}}$  = 10 Па, то имеет место ограниченная совместность работы низковакуумного и высоковакуумного насосов, что допускается в высоковакуумных системах с устойчивым газоразделением.

Расчет форвакуумного баллона. Воспользуемся формулой (2.11) для расчета форвакуумного баллона без адсорбента. В соответствии с исходными данными производительность  $Q = 5,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> Па/с, время работы баллона  $t = 30$  мин вынуждает из условия поддержания работн пароструйного насоса в случае отключения механического насоса, конечное давление  $P_{\text{к}} = 0,5 \cdot P_{\text{в}} = 0,5 \cdot 10 = 5$  Па, тогда объем баллона

$$V_{\text{Ф}} = \frac{Q \cdot t}{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}} = \frac{5,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1800}{5 - 0,38} = 0,02 \text{ м}^3.$$

Для уменьшения объема форбаллона используют адсорбент (например, активированный уголь СКТ-2). В этом случае объем форбаллона

$$V_{\text{Ф}} = \frac{Q \cdot t - K_{\text{T}} \cdot G (P_{\text{к}} - P_{\text{н}})}{P_{\text{к}} - P_{\text{н}}} = \frac{5,2 \cdot 10^{-5} \cdot 1800 - 0,1 \cdot 0,1 \cdot 4,62}{4,62} = 0,001 \text{ м}^3,$$

где  $K_{\text{T}} = 0,1$  кг/м<sup>2</sup> - коэффициент адсорбции СКТ-2 при 293 К;  $G = 0,1$  кг - масса СКТ-2.

Расчет времени наступившего режима работы вакуумного агрегата. Для расчета времени откачки воспользуемся формулами (2.20) и (2.21). Весь диапазон давления работ агрегата разбиваем на отдельные промежутки и рассчитываем время откачки для каждого промежутка. Эффективные скорости откачки  $S_{\text{эф}i+1}$  при откачке мешающими насосом рассчитывают для вязостного режима, при этом используют проводимость I и II участка; эффективные скорости действия при откачке высоковакуумным насосом рассчитываются для молекулярного режима с использованием проводимости I участка. Для приближенного расчета проводимостей при различных давлениях воспользуемся методикой, изложенной в [1]. Объем вакуумной системы  $V = 2 \text{ м}^3$ . Результаты расчетов сведены в табл. 2.14. Расчет времени откачки показывает, что общее время откачки составляет 6 ч 45 мин.

Таблица 2.14

Расчет времени откачки угольной

$P_{\text{к}}$ , Па	$P_{\text{к}+1}$ , Па	$S_{\text{эф}i}$ , м <sup>3</sup> /с	$S_{\text{эф}i+1}$ , м <sup>3</sup> /с	$S_{\text{эф}i+1}$ , м <sup>3</sup> /с	$S_{\text{эф}i+1}$ , м <sup>3</sup> /с	$S_{\text{эф}i}$ , м <sup>3</sup> /с	$S_{\text{эф}i}$ , м <sup>3</sup> /с	$F_{\text{т}}$ , с	Тип насоса
$10^5$	$10^2$	0	0	0	0	0	0	0	НН-461М
$10^2$	$10^1$	0,75 · 10 <sup>-3</sup>	0,75 · 10 <sup>-3</sup>	0	0	0	0	0	НН-461М
$10^1$	$10^{-1}$	0,391	0,271	10 <sup>-4</sup>	0,271	7 · 10 <sup>-3</sup>	0,331	13,9	Н-50-М
$10^0$	$10^{-2}$	0,271	0,243	7 · 10 <sup>-3</sup>	0,243	5 · 10 <sup>-3</sup>	0,251	18,3	Н-50-М
$10^{-1}$	$10^{-3}$	0,243	0,243	5 · 10 <sup>-3</sup>	0,243	5,5 · 10 <sup>-2</sup>	0,228	20,2	Н-50-М
$10^{-2}$	$10^{-4}$	0,243	0,243	5,5 · 10 <sup>-2</sup>	0,243	2,3 · 10 <sup>-1</sup>	0,102	45,1	Н-50-М

Определение приведенных годовых затрат на приобретение и эксплуатацию вакуумного агрегата. Перенесем уравнение (1.12) правую частью для I участка:

$$\begin{aligned} \Pi_I = & (E + \frac{1}{T})(A_H \cdot S_H^{m_3} + A_A \cdot U_{лос}^{m_3} + A_{31} \cdot U_{31}^{m_3} + A_{32} \cdot U_{32}^{m_3} + \\ & + 4 A_{тр} \cdot U_{ктр}^{m_3} + B_H \cdot S_H^{m_3} + B_A \cdot U_{лос}^{m_3} + \\ & + B_{31} \cdot U_{31}^{m_3} + B_{32} \cdot U_{32}^{m_3}), \end{aligned}$$

где в первых двух скобках отражены эффективные годовые затраты на приобретение оборудования, в третьей - эффективные годовые эксплуатационные расходы;  $E = 0,15$ ;  $T = 10$ . Воспользуемся табл. 1.6, 1.7 и 1.8 и определим каждое слагаемое:

$$A_H \cdot S_H^{m_3} = 260 \cdot 0,5^{0,478} = 186,7 \text{ руб};$$

$$A_A \cdot U_{лос}^{m_3} = 558 \cdot 1,46^{0,25} = 613,4 \text{ руб};$$

$$A_{31} \cdot U_{31}^{m_3} = 2160 \cdot 0,47^{0,5} = 1480,8 \text{ руб};$$

$$A_{32} \cdot U_{32}^{m_3} = 2160 \cdot 0,47^{0,5} = 1480,8 \text{ руб};$$

$$4 A_{тр} \cdot U_{ктр}^{m_3} = 4 \cdot 2000 \cdot 4,84^{0,33} \cdot 0,2^2 \cdot 83 = 134,4 \text{ руб};$$

$$B_H \cdot S_H^{m_3} = 0,054 \cdot 0,5^{0,33} = 4,3 \cdot 10^{-2} \text{ руб};$$

$$B_A \cdot U_{лос}^{m_3} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,46^{0,16} = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ руб};$$

$$B_{31} \cdot U_{31}^{m_3} = B_{32} \cdot U_{32}^{m_3} = 8 \cdot 10^{-4} \cdot 3,44^{0,077} = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ руб};$$

$$\begin{aligned} \Pi_I = & (0,15 + 0,1) (186,7 + 613,4 + 1480,8 + 1480,8 + 134,4) + \\ & + (4,3 \cdot 10^{-2} + 5,9 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4}) = 974 \text{ руб}. \end{aligned}$$

Аналогично определяются эффективные годовые расходы для II участка:

$$\begin{aligned} \Pi_{II} = & (0,15 + 0,1) [3130 \cdot (0,78 \cdot 10^{-3})^{0,5} + 558 \cdot 0,13^{0,25} + \\ & + 2 \cdot 125 \cdot (1,4 \cdot 10^{-3})^{0,117} + 2 \cdot 2000 \cdot 0,48^{0,33} \cdot 0,2^2 \cdot 83 + \\ & + 2 \cdot 2000 \cdot (6,8 \cdot 10^{-3})^{0,33} \cdot 0,2^2 \cdot 83] + \\ & + [0,317 \cdot (0,78 \cdot 10^{-3})^{0,5} + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,13^{0,16} + \\ & + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot (1,4 \cdot 10^{-3})^{0,077}] = \\ & = 0,25 \cdot (87,4 + 335 + 115,8 + 31,2 + 7,7) + \\ & + (8,85 \cdot 10^{-3} + 3,6 \cdot 10^{-3} + 9,6 \cdot 10^{-4}) = 144,2 \text{ руб}. \end{aligned}$$

Приведенные годовые затраты для всего агрегата составили:

$$\Pi = \Pi_I + \Pi_{II} = 940,4 + 144,2 = 1088,6 \text{ руб}.$$

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки. - Л.: Машиностроение, 1975. - 336 с.
2. Розанов Л.Н., Печатников Ю.М., Донская М.М. Подсистема автоматического проектирования вакуумных агрегатов. Автоматизация проектирования в машиностроении: Междвузовский сборник. - Л. МИ, 1987. - 104 с.
3. Вакуумная техника. Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
4. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. - М., Высшая школа, 1982. - 207 с.

## Содержание

Введение . . . . .	3
1. Автоматизированное проектирование принципиальных вакуумных схем. . . . .	5
1.1. Общее описание . . . . .	5
1.2. Руководство для системного программиста. . . . .	12
1.3. Руководство для оператора . . . . .	18
1.4. Руководство для оператора. . . . .	21
2. Проверочный расчет вакуумной системы. . . . .	28
2.1. Стационарный режим работы. . . . .	28
2.2. Нестационарный режим работы. . . . .	35
2.3. Пример проверочного расчета вакуумной системы	36
Литература . . . . .	58