

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МНОГОКАМЕРНЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Львов Б.Г., Ветров В.А.

**Московский государственный институт электроники и математики
115054, Москва, ул. Малая Пионерская д.12-18/4-6**

В статье рассматривается методика формирования математических моделей функционирования многокамерных вакуумных систем на основе метода элементно-узловых структур. Предложенная методика позволяет проводить моделирование изменения давления в вакуумной системе при произвольном изменении ее структуры.

ВВЕДЕНИЕ

На начальных стадиях проектирования, когда имеет место неопределенность исходных данных и проведение реальных экспериментов требует больших материальных и временных затрат, целесообразным является применение методов математического моделирования, позволяющих установить работоспособность предлагаемых функциональных и принципиальных схем и определить требования к их структурным составляющим без изготовления узлов и проведения экспериментов. Из разработанных моделей функционирования технических объектов вытекает большинство проектировочных расчетов.

Разработке моделей функционирования вакуумных систем (ВС) посвящен ряд работ. В этих трудах исследуется течение разреженных газов [1, 2], анализируются молекулярные потоки в неравновесных системах и процессы газоизделия в вакууме [3], изучаются системы со шлюзовыми камерами [4] и другие процессы.

Моделирование многокамерных ВС, в состав которых входят несколько вакуумных камер или секционированная вакуумная камера, требует разработки моделей, описывающих функционирование при произвольном варьировании структуры ВС, что не предусматривают вышеуказанные подходы. Такими ВС обладают создаваемые в настоящее время миниатюрные технологические и физико-аналитические оборудование и приборы [5-7].

МЕТОДИКА

Для разработки моделей функционирования многокамерных ВС наиболее подходит метод элементно-узловых структур [8]. Используя этот метод, предлагается рассматривать ВС как совокупность конечного числа вакуумных модулей (ВМ). ВМ представляет собой неделимое

целое с сосредоточенными параметрами, имеющее конечное число узлов, через которые проходит газовый поток. В качестве узлов выступают средства откачки эффективной быстроты действия, источники газа или коммуникации с другими ВМ. Соблюдаются принципы неразрывности потока газа и сохранения количества движения.

Модель функционирования многокамерных ВС представляет собой систему уравнений, описывающих динамические связи между внутренними (давление, объем, поток газа со стороны ВМ) и внешними параметрами ВМ (проводимость коммуникаций, потоки напускаемых газов, быстрота действия средств откачки). Обобщенная схема ВМ представлена на рис. 1, а.

Модель функционирования ВМ формируется в виде компонентного уравнения

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij}(P_j - P_i) - P_i \sum_{m=1}^M S_m + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i, \quad (1)$$

где V_i – объем ВМ, P_i – давление в ВМ, t – время, на основе уравнений баланса газовых потоков

$$\sum_{k=1}^n Q_k = 0, \quad (2)$$

где Q_k – потоки через узлы ВМ, n – число узлов в ВМ. Модель функционирования многокамерной ВС представляет собой систему уравнений, сформированную на основе моделей каждого ВМ,

$$\left\{ \sum_{k=1}^n Q_k = 0 \right\}, i = 1, m, \quad (3)$$

где m – число ВМ.

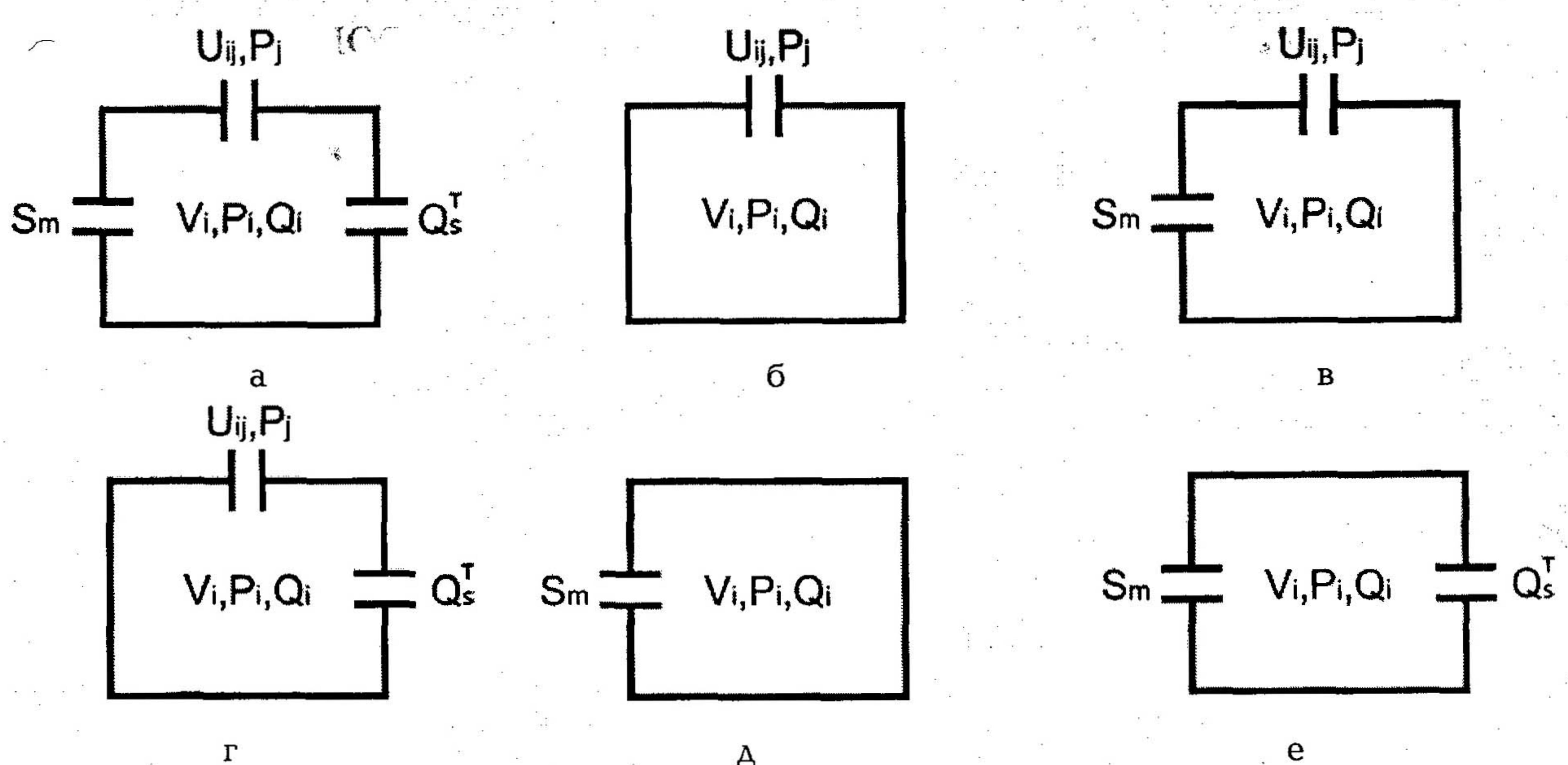


Рис. 1. Обобщенная и типовые схемы ВМ

Обобщенная схема ВМ (рис. 1, а) описывается следующим уравнением баланса газовых потоков:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) - P_i \sum_{m=1}^M S_m + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i \quad (4)$$

где N – число смежных ВМ, M – число средств откачки, S – число источников напускаемых газов, Q_i – поток газа со стороны ВМ, U_{ij} – проводимости узлов ВМ, связывающих его со смежными ВМ, P_j – давление в смежных ВМ, S_m – эффективная быстрота действия средств откачки, Q_{sm} – потоки напускаемых газов.

Поток газа со стороны ВМ Q_i в общем случае представляет собой сумму потоков газовыделения, сорбции, газопроницания, натекания через дефекты и соединения и др.

Обобщенная схема ВМ определяет шесть практически реализуемых типовых ВМ, включая себя, которые представлены на рис. 1. Типовые ВМ описывается следующими математическими моделями функционирования. ВМ на рис. 1, а:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) - P_i \sum_{m=1}^M S_m + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i \quad (5)$$

ВМ на рис. 1, б:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) + Q_i. \quad (6)$$

ВМ на рис. 1, в:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) - P_i \sum_{m=1}^M S_m + Q_i. \quad (7)$$

ВМ на рис. 1, г:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = \sum_{j=1}^N U_{ij} (P_j - P_i) + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i \quad (8)$$

ВМ на рис. 1, д:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = -P_i \sum_{m=1}^M S_m + Q_i. \quad (9)$$

ВМ на рис. 1, е:

$$\frac{d(P_i V_i)}{dt} = -P_i \sum_{m=1}^M S_m + \sum_{s=1}^S Q_s^T + Q_i. \quad (10)$$

Функционирование многокамерной ВС определяется количеством и связями выделенных типовых ВМ и описывается совокупностью их моделей функционирования. Необходимая структура ВС и соответствующая ей модель

функционирования получается добавлением или удалением типовых ВМ. При этом графическое изображение ВС представляется в виде расчетной вакуумной схемы, составляемой из схем типовых модулей (рис. 1).

Задав для полученной системы дифференциальных уравнений начальные условия, одним из существующих методов проводится моделирование процесса вакуумной откачки (напуска, перетекания газа), результатом которого становятся значения давления P_i во всех ВМ ВС в каждый дискретный шаг решения системы момент времени.

6

ПРИМЕНЕНИЕ

В настоящее время, используя новые достижения научно-технического прогресса, ведутся исследовательские работы, направленные на миниатюризацию технологического и физико-аналитического оборудования и приборов электронной техники. В этом направлении работают ведущие зарубежные компании и научные центры: Munro's Electron Beam Software Ltd. (Великобритания), Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California (США), JEOL Ltd., Fujitsu Labs. Ltd. (Япония), ICT GmbH, Applied Materials/Integrated Circuit Testing GmbH (Германия) и др.

Миниатюризация физико-аналитического оборудования, например, растровых электронных микроскопов (РЭМ), масс-спектрометров, газовых хроматографов, неразрывно связана со снижением массогабаритных характеристик вакуумных систем.

В частности, разработка миниатюрного РЭМ требует определения давления остаточной газовой среды в секциях его электронно-оптической колонны с целью выбора рациональных значений ее геометрических параметров для обеспечения функционирования электронного пучка. Из-за сверхнизких габаритных размеров колонны (диаметр ВМ – 10 мм, диаметры отверстий – от 0,2 до 1 мм) моделирование является практически единственным способом решения этой задачи. На рис. 2 представлена расчетная вакуумная схема одной из предлагаемых структурных схем колонны.

Проводимости U_{12} , U_{23} , U_{34} определены диаметрами апертуры и вытягивающего электрода *dapert* и диаметром канала электростатических линз *dlinz* соответственно.

В соответствии с разработанной методикой, ВС электронно-оптической колонны миниатюрного РЭМ соответствует следующая математическая модель функционирования:

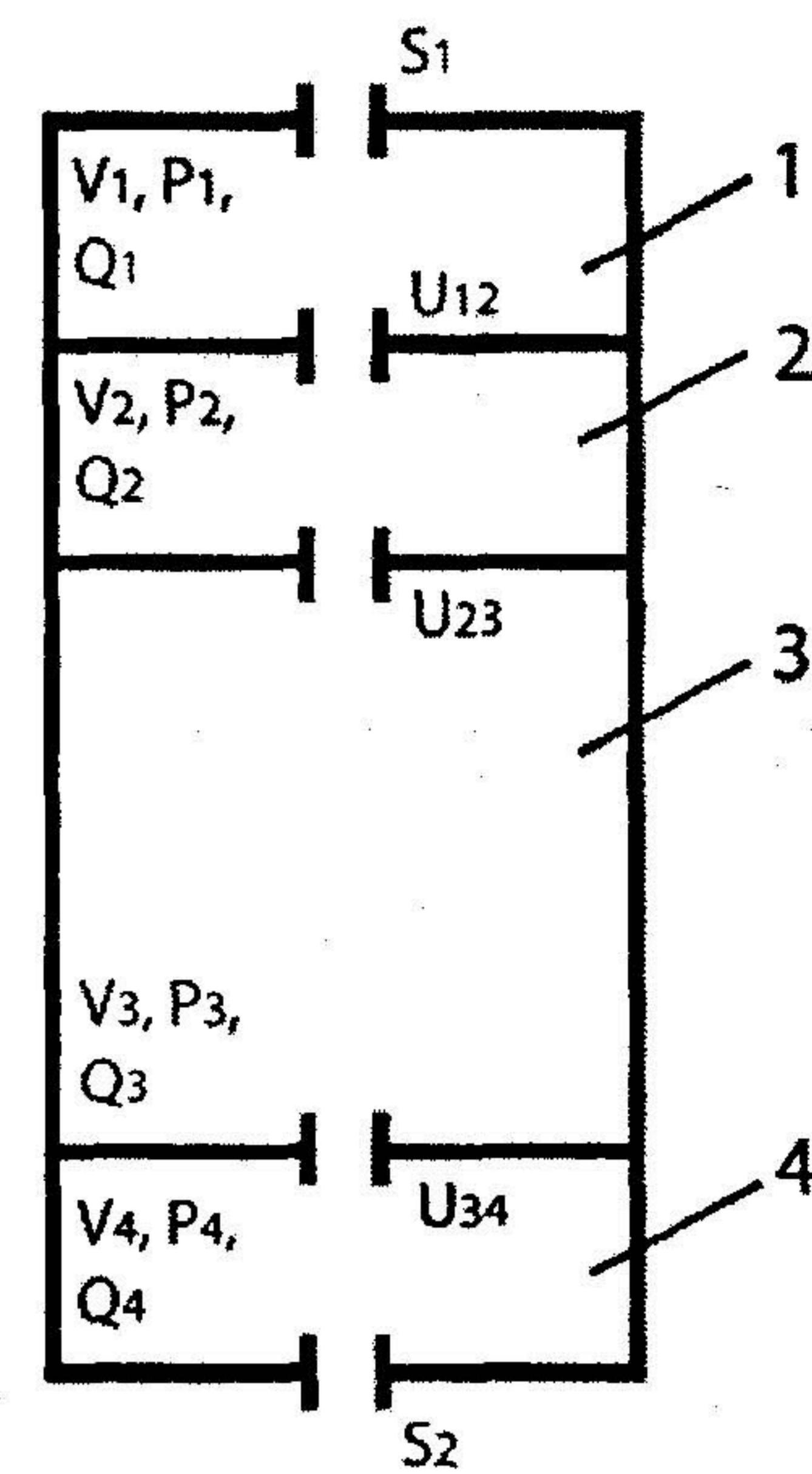


Рис. 2. Расчетная вакуумная схема колонны электронно-оптической колонны миниатюрного РЭМ: 1 – секция катода; 2 – экстрагирующая секция; 3 – секция электронно-оптической системы (ЭОС)

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 \frac{dP_1}{dt} = U_{12}(P_2 - P_1) - S_1 P_1 + Q_1 \\ V_2 \frac{dP_2}{dt} = U_{21}(P_1 - P_2) + U_{23}(P_3 - P_2) + Q_2 \\ V_3 \frac{dP_3}{dt} = U_{23}(P_3 - P_2) + U_{24}(P_4 - P_3) + Q_3 \\ V_4 \frac{dP_4}{dt} = U_{34}(P_4 - P_3) - S_2 P_4 + Q_4 \end{array} \right. . \quad (11)$$

Система (11) решается известными численными методами, например, методом Рунге-Кутты. В частном случае для определения давления в секциях колонны необходимо решить систему (11) в стационарном режиме откачки при молекулярном режиме течения газа. При этом множители и слагаемые уравнений системы

$$U_{ij} = F(P_i, P_j), Q_i = F(t), \quad (12)$$

преобразуются в

$$U_{ij} = \text{const}, Q_i = \text{const}. \quad (13)$$

а левые части уравнений системы обнуляются, что трансформирует ее в систему линейных алгебраических уравнений.

Решая полученную систему методом замещения Гаусса, имеем ряд зависимостей давления

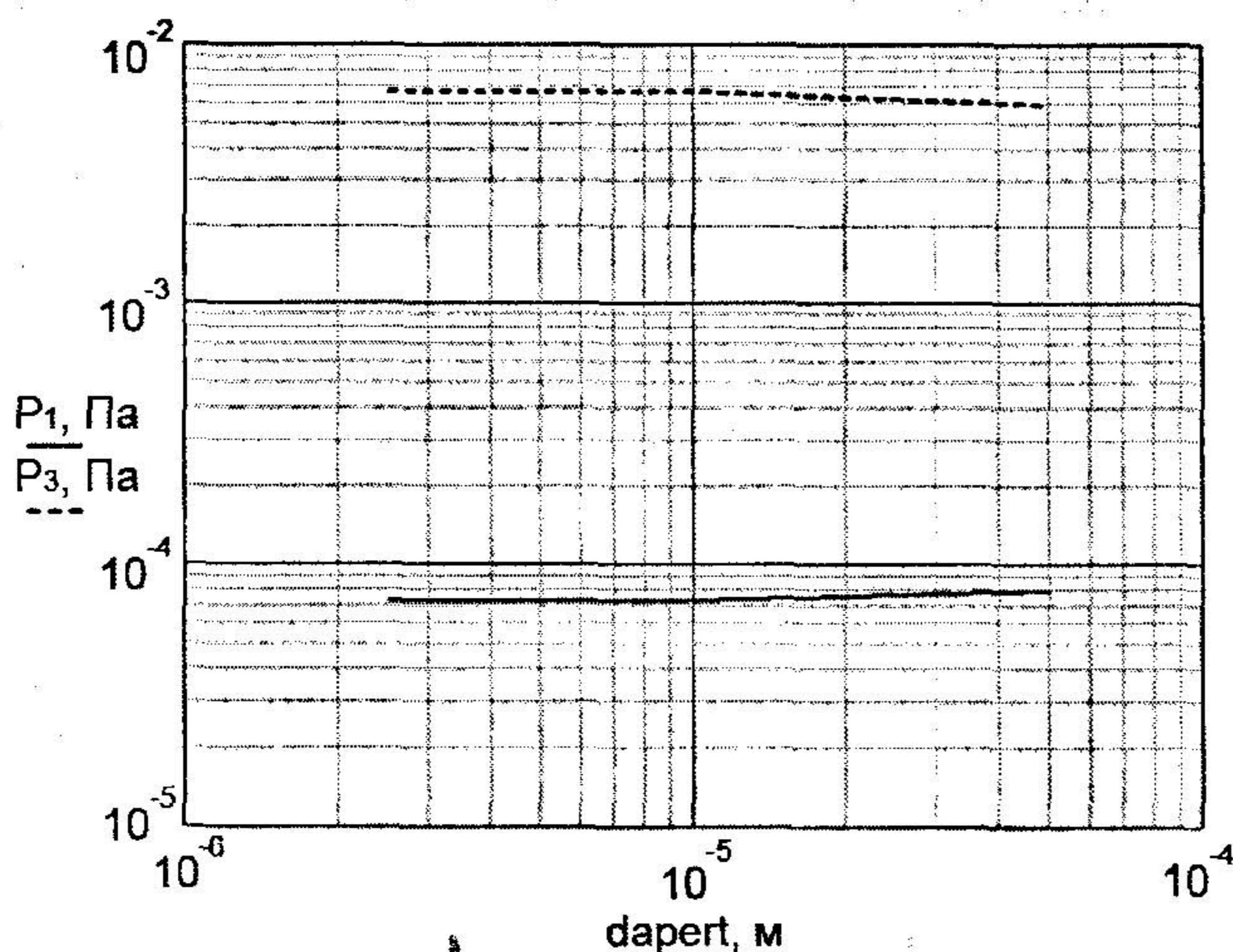


Рис. 3. Зависимость давлений в секциях катода P_1 и ЭОС P_3 от диаметра апертуры и вытягивающего электрода $dapert$ ($dlinz = 200$ мкм, $S_1 = 0,1$ л/с, $S_2 = 0,1$ л/с)

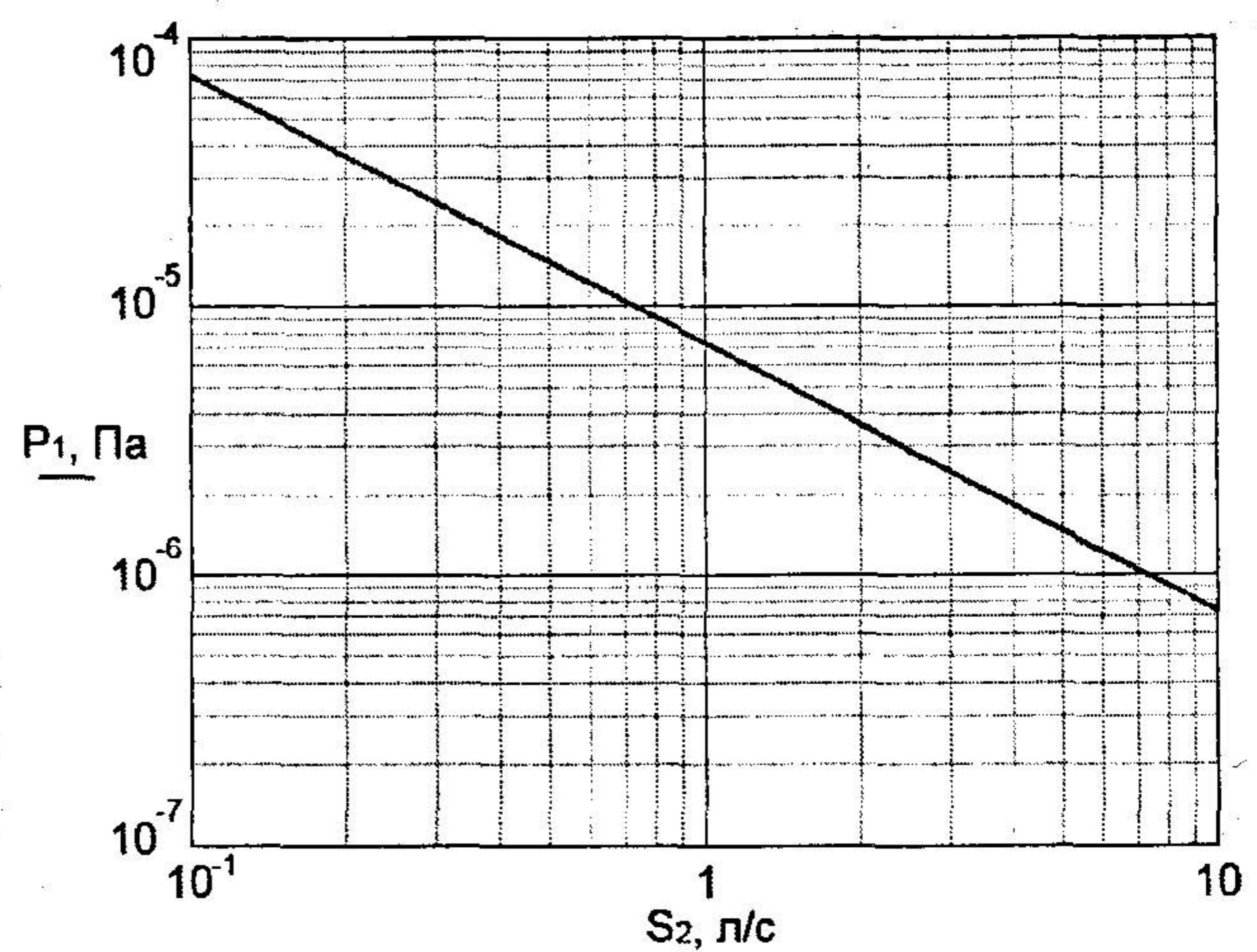


Рис. 4. Зависимость давления в секции катода P_1 от быстроты действия насоса S_2 ($dapert = 2,5$ мкм, $dlinz = 200$ мкм, $S_1 = 0,1$ л/с)

остаточной газовой среды в колонне от ее различных конструктивных параметров [9], две из которых представлены на рис. 3 и 4.

Полученные результаты показывают, что предложенная методика адекватна реальным вакуумным процессам и может быть использована для создания математических моделей функционирования различного технологического и физико-аналитического вакуумного оборудования.

ВЫВОДЫ

Предложена методика формирования математических моделей функционирования многокамерных ВС на основе метода элементно-узловых структур, позволяющая проводить моделирование изменения давления в вакуумной системе при произвольном изменении ее структуры.

Введено понятие вакуумного модуля, на основе обобщенной схемы которого определено шесть типовых ВМ. Для каждого типового ВМ разработаны математические модели. Представляя ВС в виде совокупности ВМ, путем объединения соответствующих им математических моделей получают математическую модель функционирования ВС.

Рассмотрено использование предложенной методики для определения давления остаточной газовой среды в электронно-оптической колонне миниатюрного РЭМ. Полученные в результате моделирования зависимости говорят об адекватности рассматриваемой методики.

Summary

The method of the multichamber vacuum systems mathematical models forming on basis of

the element-node structures method is considered in this paper. Offered method allows to simulate vacuum pumping under free vacuum system structure variations.

Литература

1. Itoh A., Nakazawa M., Ueda S.C. Моделирование вакуумной системы методом конечных разностей // Journal of Society of Japan. – 1987. – V.30, № 5. – P. 420 – 424.
2. Печатников Ю.М. Современные модели и методы моделирования переходного течения разреженных газов // ЖТФ. – 2003. – № 12. – С. 20 – 25.
3. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
4. Сыргин В.К., Ручнов С.В. Моделирование и расчет шлюзовых систем вакуумного технологического оборудования // Сб. тр. МИЭТ «Моделирование и расчет элементов и устройств технологического оборудования микроэлектроники». – 1985. – С. 9 – 21.
5. Львов Б.Г., Суворинов А.В., Филипчук О.И. Моделирование функционирования вакуумного тракта низковольтной электронно-оптической системы // Изв. РАН. Сер. физическая. 1997. – Т.61, № 10 – С.1913 – 1917.
6. Khursheed A. Construction and design of a high-resolution portable scanning electron microscope column // Proc. SPIE. – 1999. – V. 3777. – P. 116 – 124.
7. Coyle S.T., Shamoun B., Yu M., Maldonado J., Thomas T., Holmgren D., Chen X., Schienfein M.R., De Vore B., Gesley M. Progress toward a raster multibeam lithography tool // J. Vacuum Sci. Technol. B. – 2004 – V.22, № 2 – P501 – 505.
8. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков Н.П. Теоретические основы САПР: Учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
9. Ветров В.А., Львов Б.Г. Выбор вакуумной структурной схемы миниатюрной электроннолучевой колонны // Матер. XII науч.-тех. конф. «Вакуумная наука и техника». – М.: МИЭМ. – 2005. – С. 29 – 33.