



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-46  
ОУНК

А.М. Кивер, К.Г. Мирзоев

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ  
В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ УНК-600  
МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

Протвино 1998

**Аннотация**

Кивер А.М., Мирзоев К.Г. Определение среднего давления в вакуумной камере УНК-600 методом Монте-Карло: Препринт ИФВЭ 98-46. – Протвино, 1998. – 9 с., 4 рис., 2 табл., библиогр.: 10.

Разработана методика расчета среднего давления в вакуумной камере УНК-600 на основе использования метода статистических испытаний для определения значений давления в различных участках камеры. Приведены результаты градуировки давления по току магниторазрядных насосов, откачивающих камеру.

**Abstract**

Kiver A.M., Mirzoev K.G. The Determination of Average Pressure by the Monte Carlo Method in the Vacuum Chamber of the UNK-600: IHEP Preprint 98-46. – Protvino, 1998. – p. 9, figs. 4, tables 2, refs.: 10.

The calculation of the average pressure in the UNK-600 vacuum chamber by means of the statistical tests method for the determination of the pressure value in chamber components has been developed. The results of the pressure graduation by the discharge current of the sputter-ion pumps pumping-out the chamber are presented.

Вакуумная система УНК–600 [1] разработана с учетом возможности получения в пучковой камере среднего давления  $(1 \div 2) \cdot 10^{-9}$  мм рт.ст. в азотном эквиваленте по кулоновскому рассеянию. Структурной единицей вакуумной системы является участок вакуумной камеры между двумя разделительными шиберными затворами, соответствующий периоду магнитной структуры. Поэтому для вычисления среднего давления в камере ускорителя необходимо определить среднее давление в каждом из периодов. На длине периода, равной 92 м, установлен только один манометрический преобразователь в патрубке поста предварительной откачки, который измеряет локальное значение давления в месте своего нахождения в стороне от пучка.

В то же время в состав периода входят камеры различных сечений, а также элементы и узлы с разными значениями потока натекания через микронеплотности и потока газовыделения с поверхности. Это обуславливает возможность значительного разброса величины давления на длине периода ввиду малой проводимости камер. Поэтому показание манометра может характеризовать среднее давление в периоде только качественно, по порядку величины. Среднее давление в каждой камере периода предполагается определять по току магниторазрядной части насосов, установленных в патрубках камеры, имея в виду линейную зависимость тока от давления в насосе. При этом необходимо проводить пересчет от давления в насосе к давлению в камере для разных типов патрубков ввиду относительно сложной конструкции узла патрубка насоса с лайнером.

Целью настоящей работы явилась разработка методики определения среднего давления в ионопроводе УНК–600 по измеренным токам разряда магниторазрядной части насосов ПВИГ–100 и ПВИГ–250 [1] до и после распыления титана в сублимационной части с учётом геометрии различных патрубков с лайнерами.

Период регулярной части вакуумной системы откачивается 16 насосами типа ПВИГ, патрубки которых по конструкции и типу насосов можно условно разбить на 3 группы: лайнер с апертурой  $70 \times 62$  мм<sup>2</sup> и насосом ПВИГ–100 (тип А); лайнер  $90 \times 48$  мм<sup>2</sup> с насосом ПВИГ–100 (тип Б) и лайнер  $90 \times 48$  мм<sup>2</sup> с насосом ПВИГ–250, манометром и тройником для поста предварительной откачки (тип В). Переходный лайнер от типа А к типу Б и наоборот отдельно не рассматривается и отнесен к А или к Б. Для расчета давления в патрубках и лайнере использован метод

статистических испытаний Монте-Карло [2,3]. С помощью ЭВМ прослеживались траектории достаточно большого числа молекул остаточного газа до получения фиксированного суммарного числа соударений со стенками всех участков системы.

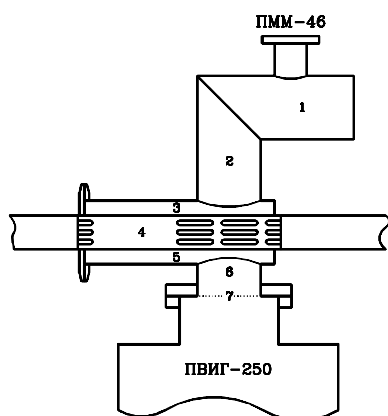


Рис. 1. Схема участка камеры с лайнером типа В. Цифры обозначают номера зон при статистических испытаниях.

На рис.1 схематически показан узел типа В с насосом ПВИГ-250. Для сокращения времени счёта конструкция системы упрощена, не учитываются такие элементы, как сильфон и быстро-разъёмные соединения, хотя их поверхность учтена при вводе в программу исходных данных. Рассмотрение ведётся в системе координат, начало которой совмещено с центром одного из торцов лайнера. Система условно разделена на 7 участков или зон, как показано на рисунке. В зоне 1 находится манометр, измеряющий давление, зона 4 — объём лайнера, 3 и 5 — верхняя и нижняя половины цилиндрического патрубкока (без объёма лайнера), разделённые горизонтальной плоскостью по оси лайнера, зона 6 — патрубкок насоса, а за зону 7 условно принято входное сечение насоса (на схеме — пунктирная линия). Предполагается,

что газовыделение единицы поверхности всех зон одинаковое, объёмная концентрация газа в пределах каждой зоны однородна, а отражение молекул от поверхности происходит по закону косинуса. В случае узлов типа А и Б патрубкока с манометром нет, поэтому число зон меньше: лайнеру соответствует зона 2, патрубкоку насоса — зона 4, верхняя и нижняя половины цилиндрического патрубкока — зоны 1 и 3 соответственно, а входное сечение насоса ПВИГ-100 — зона 5.

Старт молекулы с поверхности каждой зоны задаётся с помощью генератора или датчика случайных чисел с учётом разницы в величине поверхностей, ограничивающих зону. Поверхность камеры с обеих сторон лайнера от середины одного магнита до середины другого учтена в виде соответствующего увеличения вероятности старта молекул с двух торцов зоны лайнера. Траектория молекулы прослеживается до тех пор, пока она не будет откачана насосом, т.е. пересечёт поверхность 7 (тип В) или 5 (типы А и Б). При этом подсчитывается число столкновений молекулы с поверхностью каждой зоны.

Моделирование продолжается до тех пор, пока общее число столкновений молекул с поверхностями всех зон превысит величину  $10^6$ . Погрешность вычисления величин  $\nu_m$  — числа соударений  $N$  молекул с поверхностью  $m$ -ой зоны, определённая с достоверностью 95%, находится в пределах 5% [2], а величина  $N$  — порядка  $(1 \div 4) \cdot 10^3$ . Давление в объёме пропорционально потоку молекул на единицу поверхности его стенок. Так как метод статистических испытаний моделирует процесс реальной откачки, то число соударений моделируемых молекул с единицей поверхности  $m$ -ой зоны  $\nu_m/F_m$  пропорционально давлению  $P_m$  в этой зоне. Поэтому,

зная давление  $P_M$  в зоне 1, измеренное манометром, можно найти  $P_m$  из отношения давлений:

$$P_m = P_M \frac{\nu_m F_M}{\nu_M F_m}. \quad (1)$$

Таким образом, по рассчитанным величинам  $\nu_m$  можно определить давление в лайнере и соотношение между давлением в патрубке насоса и давлением в лайнере.

При проведении моделирования методом Монте-Карло необходимо знать вероятность пересечения молекулами плоскости входного фланца насоса, или коэффициент захвата насоса  $\alpha$ , который равен отношению объема газа  $S$  (л/с), откачиваемого насосом, к объёму газа  $V_1$ , проходящего за то же время через сечение входного фланца насоса радиусом  $R$ . Быстрота действия  $S$  насосов ПВИГ–100 и ПВИГ–250 измерялась на специальном стенде с помощью измерительных камер, выполненных в соответствии с международными стандартами [4], и определялась по известной формуле:

$$S = u \left( \frac{P_{над}}{P_{под}} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $u$  — проводимость калиброванной диафрагмы радиусом  $R_o$ ;  $P_{над}$  и  $P_{под}$  — давление газа до и после диафрагмы соответственно, причем  $P_{под}$  показывает давление во входном патрубке над фланцем насоса, соответствующее давлению  $P_6$  или  $P_4$  в патрубке насоса на периоде. Подставляя значения  $V_1 = 1/4\bar{v}\pi R^2$  и  $u = 1/4\bar{v}\pi R_o^2$ , где  $\bar{v}$  — средняя арифметическая скорость молекул при данной температуре, получаем выражение для коэффициента захвата в удобной для вычисления форме:

$$\alpha = \frac{S}{V_1} = \left( \frac{R_o}{R} \right)^2 \left( \frac{P_{над}}{P_{под}} - 1 \right). \quad (3)$$

Соотношение (3) соответствует работе [5], в которой точность определения коэффициента захвата оценивается в несколько процентов. Давления  $P_{над}$  и  $P_{под}$  измерялись ионизационными вакуумметрами ВИ–14, для которых манометрические датчики ПМИ–27 подбирались в соответствии с рекомендациями работ [4,5].

Значения коэффициента захвата так же, как и быстроты действия, изменяются при изменении давления в насосе. По результатам измерений на стенде быстроты действия 10 насосов ПВИГ–100 и двух насосов ПВИГ–250 построены зависимости средних значений коэффициентов захвата от давления в насосе  $P_{под}$  при работе только магниторазрядной части и через несколько часов после распыления титана в сублимационной части насоса, приведенные на рис.2.

Коэффициент захвата насоса ПВИГ–100 на камере периода такой же, как на испытательном стенде из-за одинаковости диаметров подсоединительного патрубка и входного фланца насоса. Для насоса ПВИГ–250 радиус патрубка меньше радиуса фланца насоса, и коэффициент захвата для этого случая определён в работе [6], в соответствии с результатами которой построены кривые  $j = 2$  и  $j = 4$  рис.2.

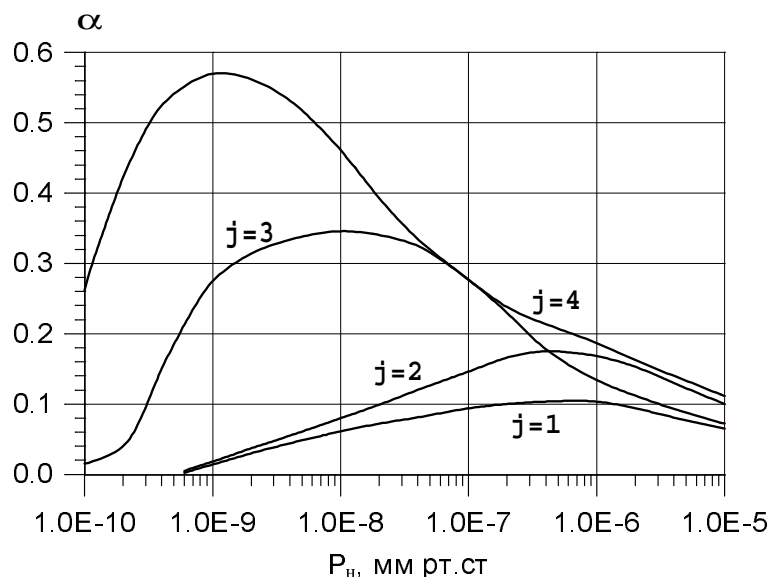


Рис. 2. Зависимости коэффициентов захвата от давления в насосах ПВИГ-100 и ПВИГ-250 при работе только магниторазрядной части ( $j = 1$  и  $j = 2$  соответственно) и после распыления титана ( $j = 3$  и  $j = 4$ ).

Как видно из рисунка, в широком диапазоне давлений  $10^{-9} \div 10^{-5}$  мм рт.ст. величина коэффициента захвата магниторазрядной части насосов находится в пределах  $0,02 \div 0,2$ , что согласуется с данными, приводимыми в литературе для данного типа насосов [7]. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек для отдельных насосов от кривых рис.2 находится в пределах  $\pm 20\%$ .

В программе статистических испытаний коэффициент захвата насоса задавался в виде вероятности пересечения падающей молекулой поверхности зоны 7 (или 5 для типов А и Б). Циклы статистических испытаний проводились при разных значениях  $\alpha$  от 0,1 до 0,5 с шагом изменения 0,1 для каждого типа лайнера. Этот диапазон соответствует экспериментальным значениям  $\alpha$  до и после распыления титана. Результаты статистических испытаний приведены в табл.1 и 2 в виде отношения давления в  $m$ -ой зоне  $P_m$  к давлению в патрубке насоса.

Таблица 1. Узел типа В с насосом ПВИГ-250, лайнер — зона 4, патрубков насоса — зона 6

	$\alpha = 0,1$	$\alpha = 0,2$	$\alpha = 0,3$	$\alpha = 0,4$	$\alpha = 0,5$
$m = 1$	1,25	1,51	1,66	1,84	2,20
$m = 2$	1,22	1,48	1,62	1,82	2,11
$m = 3$	1,13	1,44	1,63	1,81	2,10
$m = 4$	1,32	1,68	1,92	2,15	2,51
$m = 5$	1,09	1,33	1,44	1,62	1,86
$m = 6$	1	1	1	1	1

Таблица 2. Узлы типа А и Б с насосом ПВИГ–100, лайнер — зона 2, патрубков насоса — зона 4

$\alpha$	$m = 1$			$m = 2$			$m = 3$			$m = 4$
	А	Б	Сред	А	Б	Сред	А	Б	Сред	
0,1	1,39	1,30	1,35	1,59	1,47	1,53	1,29	1,22	1,26	1
0,2	1,58	1,56	1,57	1,86	1,80	1,83	1,46	1,46	1,46	1
0,3	1,83	1,76	1,80	2,16	2,02	2,09	1,69	1,66	1,68	1
0,4	1,99	1,96	1,97	2,41	2,28	2,35	1,82	1,85	1,84	1
0,5	2,14	2,14	2,14	2,52	2,50	2,51	1,96	1,98	1,97	1

По узлам А и Б взяты средние результаты для каждой из зон, и в дальнейшем под типом А будет пониматься узел с насосом ПВИГ–100. При этом максимальное отличие для каждого из типов не превосходит 4%. Как видно из таблиц, давление в лайнере является наибольшим по сравнению с другими зонами. Используя данные рис.2 и табл.1 и 2, можно построить кривые зависимости отношения давлений в лайнере и в насосе от давления в насосе. Это отношение давлений будет стремиться к 1 при  $\alpha \rightarrow 0$  (что соответствует выравниванию давления во всех зонах в установившемся режиме после прекращения работы насоса). Для  $\alpha > 0,5$  экстраполированы данные табл. 1 в диапазоне  $\alpha = 0,4 \div 0,5$ .

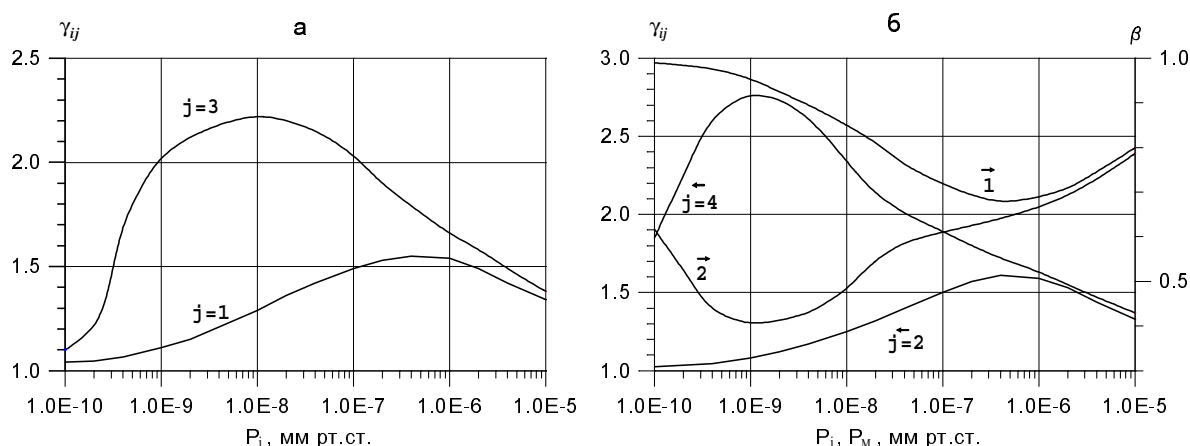


Рис. 3. Кривые отношения давлений в лайнере и насосе для узла А с ПВИГ–100 (а:  $j = 1$  — без распыления,  $j = 3$  — после распыления), узла В с ПВИГ–250 (б:  $j = 2$  — без распыления,  $j = 4$  — после распыления), а также отношения давлений в патрубке насоса ПВИГ–250 и в зоне манометра (б, кривые 1 и 2 до и после распыления титана соответственно).

Кривые отношения давлений показаны на рис.3 в виде графиков для коэффициентов пересчета  $\gamma_{ij}$  от давления в патрубке насоса  $P_i$  к давлению в соответствующем этому насосу лайнере  $P_{ij} = \gamma_{ij}P_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, 16$  — номер насоса в периоде,  $j = 1; 2$  — состояние без распыления титана, а  $j = 3; 4$  — после распыления титана для насосов ПВИГ–100 и ПВИГ–250 соответственно. После распыления титана

давление в насосе существенно снижается из-за возрастания быстроты действия насоса. Поэтому величина давления в лайнере после распыления также уменьшается, несмотря на некоторое увеличение отношения давлений в лайнере и насосе, как это следует из кривых рис.3. На рис.3б показаны также коэффициенты пересчёта  $\beta$  от давления  $P_M$ , измеренного манометром в зоне 1, к давлению в патрубке ПВИГ-250  $P_{нас} = \beta P_M$  (кривые 1 и 2 без распыления и после распыления титана соответственно).

Для осуществления возможности измерения вакуума в камере периода по току магниторазрядной части насосов производилась градуировка тока насоса по давлению над его присоединительным фланцем. С целью уменьшения ошибок градуировки проведены четыре серии измерений на трех разных установках с манометрическими преобразователями двух типов: ионизационным ПМИ-27 и магниторазрядным ПММ-46, причем результаты приводились к одному электродному блоку магниторазрядного насоса. В насосе ПВИГ-100 два таких блока, в ПВИГ-250 — 3 блока.

Градуировки по однотипным манометрическим преобразователям на разных установках достаточно хорошо согласуются между собой, однако результаты с разными манометрами при давлении ниже  $5 \cdot 10^{-9}$  мм рт.ст. отличаются до  $\pm 50\%$ . С повышением давления это отличие значительно уменьшается и при  $10^{-5}$  мм рт.ст. не превышает  $\pm 3\%$ . Это можно объяснить тем, что при малой газовой нагрузке в области сверхвысокого вакуума существенное влияние на величину измеряемого давления оказывает откачивающее действие разряда в преобразователе ПММ-46 по сравнению с ПМИ-27 [8].

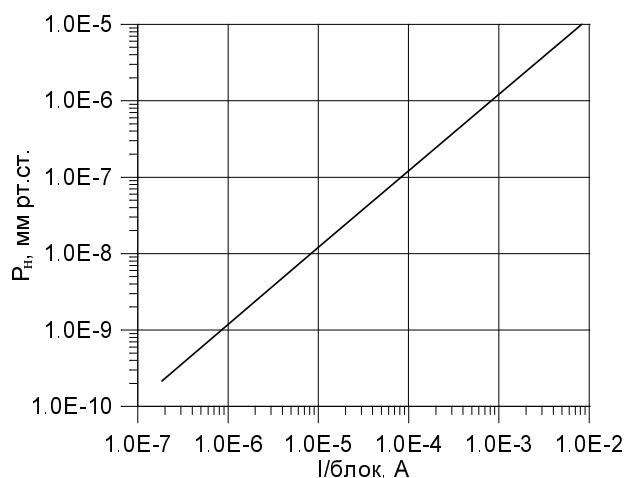


Рис. 4. Зависимость давления в патрубке насоса от тока разряда одного электродного блока насоса.

Результаты градуировки в достаточном для практического использования приближении можно представить в виде линейной зависимости давления в патрубке от тока разряда одного блока насоса, представленной на рис.4. Давление в соответствующем лайнере равно

$$P_{ij} = \gamma_{ij} C_{1,2} I_i, \quad (4)$$

где  $\gamma_{ij}$  определяется из кривых  $j = 1; 2$  рис.3 при  $P_i = C_{1,2} I_i$ , а величины  $C_1$  и  $C_2$ , определенные из рис.4, равны  $6 \cdot 10^{-4}$  и  $4 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст./А для насосов ПВИГ-100 и ПВИГ-250 соответственно. Средняя погрешность определения величин  $C$  находится в пределах  $\pm 40\%$ , что не превосходит точности измерения давления использованными при градуировке манометрическими преобразователями.



Данные значения  $C_{1,2}$  получены для токов магниторазрядных насосов без распыления титана в сублимационной части. После распыления титана приближенная оценка давления в лайнерах периода может быть проведена по показаниям манометрического преобразователя как  $P_{ij} = \gamma_{ij}\beta P_{ман}$ , где  $\beta$  определяется по кривой 2 рис.3б, а  $j = 3; 4$  — для ПВИГ-100 и ПВИГ-250 соответственно.

Как показали измерения на экспериментальном периоде [1], откачивающее действие распыленного титана без напуска атмосферного воздуха в камеру может продолжаться в течение нескольких лет. Так, через полтора года после распыления титана значение коэффициента  $C_2$  было в  $3 \div 4$  раза меньше приведенной выше величины.

Для определения среднего давления в каждой отдельной камере периода требуется знать величину потока газовыделения с поверхности камеры, а также значения давления на концах камеры в лайнерах  $P_{ij}$  и  $P_{i+1,j}$ , определенные выше. Как показано в [9], выражение для среднего давления  $\bar{P}_{ij}$  имеет вид

$$\bar{P}_{ij} = \frac{B_i q l_i^2}{12 u_{0i}} + \frac{P_{ij} + P_{i+1,j}}{2}, \quad (5)$$

где  $l_i$  и  $B_i$  — длина и периметр камеры;  $q$  — поток газовыделения единицы внутренней поверхности; а  $u_{0i}$  — удельная проводимость камеры. Применимость решений вида (5), полученных в случае вакуумной системы с периодической структурой для участков с разными  $l_i, B_i$  и  $u_{0i}$ , (т.е. находящихся на границах участков с регулярной структурой), обоснована в работе [10].

Величину  $q$ , входящую в (5), можно оценить следующим образом. Поток газа  $Q_i$ , откачиваемый каждым насосом в единицу времени при давлении в патрубке насоса  $P_i$  и быстроте действия  $S_i$ , равен сумме потока газовыделения и натекания через течи  $Q_{it}$ :

$$Q_i = S_i P_i = q F_i + Q_{it}, \quad (6)$$

где  $F_i$  — полная поверхность камеры и всех узлов, приходящаяся на  $i$ -ый насос. Можно считать, что величины удельного потока газовыделения для разных камер, лайнеров и патрубков близки между собой ввиду идентичности материала и операций предварительной обработки и очистки. Потоки натекания через микронеплотности для разных камер отличаются друг от друга, что выражается в различной величине давлений в патрубках насосов  $P_i$  камер с одинаковой  $F_i$ . Тогда при вакууме, близком к предельному, можно допустить, что для насоса с минимальным  $P_{i\min} = P_0$  из камер с одинаковой поверхностью газовая нагрузка обусловлена в основном потоком газовыделения, и для камеры с этим насосом потоком натекания можно пренебречь по сравнению с потоком газовыделения. При этих условиях  $q$  можно оценить из соотношения

$$q = \frac{S_0 P_0}{F_i}. \quad (7)$$

Такая оценка даёт, во всяком случае, верхнюю границу потока газовыделения и среднего давления, и поэтому не является оптимистической. Быстроту действия

насоса, как указывалось выше, можно выразить через коэффициент захвата  $\alpha_0$ , определенный из графиков рис.2 при данном давлении  $P_0$  и объеме газа  $V_1$  [7]:

$$S_0 = \alpha_0 V_1 = \alpha_0 3,64 \sqrt{T/M} \pi R^2 \text{ л/с}, \quad (8)$$

где  $M$  — молекулярный вес откачиваемого газа. Удельная проводимость камер имеет вид

$$u_{0i} = k_i \sqrt{T/M} \text{ л·см/с}, \quad (9)$$

где геометрический фактор  $k_i$  для эллипсных камер равен  $5,37 a_i^2 b_i^2 / \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$ ;  $a$  и  $b$  — оси эллипса.

С учетом (6)÷(9), а также  $B_i l_i \simeq F_i$  и  $R = 4,85$  см выражение (5) принимает вид

$$\bar{P}_{ij} < \frac{22,4 \alpha_0 l_i}{k_i} P_0 + \frac{P_{ij} + P_{i+1,j}}{2}. \quad (10)$$

Для массовых камер, составляющих период,  $l_i = 6,4$  м,  $k_{cp}$  для типов А, Б и В равно  $1,05 \cdot 10^3$  (если  $u_0$  в л·см/с), а  $\alpha_0 \leq 2 \cdot 10^{-2}$  при  $P_0 \leq 10^{-9}$  мм рт.ст. без распыления титана (рис.2). В этом случае (10) имеет наиболее простой вид

$$\bar{P}_{ij} < 0,3 P_0 + \frac{1}{2} (P_{ij} + P_{i+1,j}). \quad (11)$$

В общем случае в состав периода (или любого другого участка вакуумной системы) длиной  $L$  могут входить камеры разной длины. Тогда среднее давление на периоде или другом участке длины  $L$  из  $n$  камер равно

$$\bar{P} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i \bar{P}_{ij}. \quad (12)$$

Результаты, полученные в настоящей работе с помощью метода Монте-Карло, позволяют разработать конкретные программы для ЭВМ и определять среднее давление в камере ускорителя с точностью не хуже точности измерения давления ( $\pm 55\%$ ).

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность за поддержку и интерес к работе К.П.Мызникову и Ю.С.Федотову, а также И.Л.Масленникову за участие в работе.

## Список литературы

- [1] Антонов С.С. и др. — Препринт ИФВЭ 91–102, Серпухов, 1991.
- [2] Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. — М.: Атомиздат, 1980.
- [3] Xu T.W., Laurent J.M. and Grobner O. CERN–LEP–VA/86–02, Geneva, 1986.

- [4] Ficher E. and Mommson H. // Vacuum. 1967, 17, 309.
- [5] Fend Y.G. and Xu T.W. // Vacuum. 1980, 30, 377.
- [6] Кивер А.М., Мирзоев К.Г. — Препринт ИФВЭ 94–27, Протвино, 1994.
- [7] Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. — М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [8] Кузьмин В.В., Левина Л.Е., Творогов И.В. Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
- [9] Рогозинский В.Г., Ушков В.Л. — Препринт ИФВЭ 74–110, Серпухов, 1974.
- [10] Масленников И.Л., Мирзоев К.Г. — Препринт ИФВЭ 89–108, Серпухов, 1989.

*Рукопись поступила 13 июня 1998 г.*

А.М.Кивер, К.Г.Мирзоев

Определение среднего давления в вакуумной камере УНК-600 методом Монте-Карло.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 22.06.98. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.

Печ.л. 1,1.    Уч.-изд.л. 0,8.    Тираж 150.    Заказ 220.    Индекс 3649.

ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

