



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.
ИМ. АКАДЕМИКА С. И. ВАВИЛОВА

Г. Л. САКСАГАНСКИЙ

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ВАКУУМНОЙ АППАРАТУРЫ

ЗАОЧНЫЙ
ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ
ИТР

Москва • МАШИНОСТРОЕНИЕ • 1978

Председатель методического совета заочных курсов
Саксаганский Г. Л.
Научный редактор д-р физ. -мат. наук, проф. А. А. Глазков
Саксаганский Г. Л.

Основы расчета и проектирования вакуумной аппаратуры. -
М.: Машиностроение, 1978. - 76 с., ил.

В брошюре кратко излагаются важнейшие понятия молекулярно-кинетической теории газов и вакуумной техники. Формулируются принципы, цели и особенности проекторочных расчетов вакуумных систем различных типов. Анализируются источники газовой нагрузки, методика выбора и сравнительные характеристики откачных средств. Рассматриваются методы определения остаточного давления в вакуумных камерах, проводимости элементов вакуумных систем, пространственного распределения молекулярных потоков в сложных системах и системах с распределенными параметрами.

Табл. 14, ил. 20, библиогр. 7 назв.

Выпущено по заказу Заочного института повышения квалификации ИТР центрального правления НТО приборостроительной промышленности им. академика С. И. Вавилова

© Заочный институт повышения квалификации ИТР центрального правления НТО приборостроительной промышленности им. академика С. И. Вавилова, 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность и эксплуатационная надежность технологического оборудования непосредственным образом зависят от правильности принятых проектных решений. Вакуумные установки и аппараты не составляют в этом смысле исключения. Обоснованный выбор и взаимное согласование характеристик различных элементов вакуумных систем создают необходимую предпосылку для их оптимального конструирования и эксплуатации.

На первом этапе развития вакуумного аппарата- и приборостроения (вплоть до середины 1940-х годов) основу проектирования составлял анализ кинетики откачки атмосферного воздуха из компактных вакуумных камер сравнительно небольшого объема при весьма скромных (по нынешним масштабам) требованиях к остаточному давлению ($\sim 10^{-5}$ мм рт. ст.).

В последующий период содержание расчетно-теоретических и проектных изысканий существенно расширилось. Анализ чисто кинетических задач сохранил свой приоритет лишь для устройств и аппаратов с частым впуском воздуха. В связи с появлением протяженных и структурно-периодических вакуумных камер и ряда специализированных элементов вакуумных систем стали актуальными задачи их геометрической оптимизации с целью достижения наибольшей в данных габаритах проводимости. Среди компонентов газовой нагрузки важное значение приобрели распределенные потоки тепловой и стимулированной десорбции с поверхности конструкционных материалов. Порог требуемого остаточного давления снизился до 10^{-6} - 10^{-8} мм рт. ст.

1960-е годы ознаменовались быстрым прогрессом в области высоковакуумных насосов. В один ряд с диффузионными, на протяжении десятилетий бывшими практически единственными средствами высоковакуумной откачки, стали насосы испарительные и конденсационные, магниторазрядные и турбомолекулярные, ионные и криоадсорбционные. Нижний предел достижи-

мых давлений снизился до $\sim 10^{-10}$ мм рт. ст., и одной из важных проектных задач стало обеспечение оптимальной для проектируемой установки комбинации насосов различных типов.

В этот же период произошел качественный перелом масштабного характера. Стали реальностью высоко- и сверхвысоковакуумные камеры (имитаторы космоса) объемом $10^4 - 10^5$ м³ для испытаний ракет и космических летательных аппаратов. Для построения компоновочных схем имитаторов, обеспечивающих максимальное приближение условий испытаний к натурным, и для правильной интерпретации результатов испытаний потребовалась разработка методов анализа пространственного распределения молекулярных и лучистых потоков в многокомпонентных термически неоднородных структурах высокой геометрической сложности. Одновременно были поставлены задачи геометрической оптимизации насосов поверхностного действия.

В конце 1960-х годов наметился переход к системам автоматизированного управления комплексными вакуумными установками и оборудованием, что существенно изменило характер проектно-конструкторских решений. В последние годы наблюдается тенденция к дальнейшему снижению предельного остаточного давления, вплоть до $\sim 10^{-12}$ мм рт. ст. и росту скорости действия средств высоковакуумной откачки, превышающей в настоящее время $\sim 10^5$ л/с в одном агрегате. Эти тенденции, особенно характерные для уникальных исследовательских установок, требуют дальнейшего развития методики расчетно-теоретических и проектных работ.

Отмеченная эволюция задач проектирования целиком определила используемые методические приемы и математический аппарат. Уравнение диффузии продолжает составлять основу решения подавляющего большинства кинетических задач. В ряде случаев, в особенности при поворочных расчетах, оно дополняется электрическим моделированием вакуумных систем. Сохраняют свою ценность методы расчета, опирающиеся на понятия скорости откачки и проводимости. Для определения последней наряду с классическими аналитическими методами (уравнение Пуазейля - для вязкостного и подход Кнудсена-Клаузинга-для молекулярного течения) все более широко используется численный метод статистических испытаний.

В последнее десятилетие быстрое развитие получили новые методы, базирующиеся на интегро-дифференциальных уравнениях массо- и теплопереноса в вакуумных системах. Эти методы позволяют построить замкнутую систему понятий и функциональных зависимостей, полностью и практически на любом уровне детализации описывающих поведение разреженного газа безот-

носителю к степени термодинамической равновесности системы "газ - стенка" и однородности поля газокINETического давления. Этим они принципиально отличаются от системы понятий и представлений "классической" вакуумной техники. На основе этих методов развиты принципы оптимизации насосов поверхностного действия, и возможно построение математической модели вакуумной системы в целом, оптимизированной по одной или нескольким группам критериев. На этой же основе разработан инженерный метод проектирования многокомпонентных вакуумных систем любой геометрической сложности ("метод эквивалентных поверхностей") - задача, принципиально не имеющая решения в рамках "классической" вакуумной техники.

В инженерной практике наиболее плодотворные результаты обычно дает совокупное применение "классических" и новых методов расчета.

Крупный вклад в создание методов расчета и проектирования вакуумных систем внесен советскими учеными. В значительной мере благодаря отечественным работам сегодня можно уже с достаточным основанием говорить о становлении новой инженерной дисциплины - теоретических основ проектирования вакуумных систем. Эта дисциплина опирается на фундаментальные положения молекулярно-кинетической теории газов, включает ставшие уже классическими исследования закономерностей течения разреженных газов в различных элементах вакуумных установок и обобщает результаты новейших разработок и исследований, направленных на оптимизацию структуры и характеристик вакуумных систем.

В настоящей брошюре дано конспективное изложение идей и методов этой формирующейся дисциплины.

Принятые обозначения

- a - характеристический размер трубопровода;
- $d, 2r$ - диаметр цилиндрического трубопровода;
- D_0 - коэффициент самодиффузии газа;
- E - кинетическая энергия молекулы газа;
- F - площадь, поверхность;
- f - функция распределения молекул;
- G - пропускная способность (проводимость) трубопровода;
- k - постоянная Больцмана; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·град⁻¹;
- l - длина трубопровода;
- M - молекулярная масса;
- m - масса газа;

- m_0 - масса одной молекулы газа;
 N - число молекул газа, занимающего данный объем;
 N_0 - число Авогадро: $N_0 = 6,023 \cdot 10^{26}$ кмоль⁻¹;
 n - молекулярная концентрация;
 n_0 - число Лoshмидта; $n_0 = 2,69 \cdot 10^{19}$ см⁻³;
 p - давление газа;
 p_H - давление во входном сечении насоса, нагруженного газовым потоком;
 p_p - рабочее давление в вакуумной камере;
 p_{OH} - предельное остаточное давление насоса;
 Q - газовый поток в данном сечении камеры или трубопровода; производительность насоса;
 ρ - плотность газового потока;
 R - универсальная газовая постоянная: $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж·град⁻¹·кмоль⁻¹;
 S_{OH} - номинальная быстрота действия насоса, соответствующая плато или максимуму (при отсутствии плато) на зависимости $S_H = f(p)$;
 T - абсолютная температура газа, К;
 t - время;
 V - объем, занимаемый данной массой газа; объем камеры;
 V_0 - объем, занимаемый потоком газа, падающим за единицу времени на единичную площадь стенки;
 v - скорость молекулы газа;
 β - коэффициент прилипания (конденсации) молекул газа на поверхности;
 η - коэффициент вязкости газа;
 λ - средняя длина свободного пробега молекулы;
 $v = \frac{Q}{A T}$ - плотность потока газовых частиц, падающих на стенку или проходящих через данное сечение вакуумной камеры (частиц на единицу поверхности в единицу времени).

Используемые сокращения

- БД - быстрота действия вакуумного насоса;
 БО - быстрота откачки;
 ВВН - высоковакуумный насос;
 ВК, ВС, ВТ, ВУ - вакуумная камера, система, техника, установка;
 ВН - вакуумный насос;
 ВСРП - вакуумная система с распределенными параметрами;
 ВССП - вакуумная система с сосредоточенными параметрами;
 ГВ - газовыделение;

ИКМ - интегрально-кинетический метод;

Мл - молекула;

МлП - молекулярный поток;

ММК - метод Монте-Карло;

МУК - метод угловых коэффициентов;

МЭП - метод эквивалентных поверхностей;

Пв - поверхность;

ПС - пропускная способность трубопровода;

РД - рабочее давление остаточных газов в камере;

РГ - разреженный газ;

Тр - трубопровод;

ФР - функция распределения;

ЭВС - элемент вакуумной системы;

ЭП - эквивалентная поверхность

I. ВАЖНЕЙШИЕ ПОНЯТИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Объектом технологических операций вакуумной техники (ВТ) является разреженный газ (РГ), близкий по свойствам к идеальному. Основные параметры состояния РГ - давление, объем и температура связаны соотношением Клайперона-Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (1)$$

откуда легко получить выражение для его плотности

$$\rho = 1,6 \cdot 10^{-2} \frac{M p_{\text{мм рт.ст.}}}{T} \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

В большинстве вакуумных установок (ВУ) газ находится в термодинамическом равновесии со стенками. Величины скорости и кинетической энергии молекул (Мл) такого газа подчинены законам распределения Максвелла-Больцмана (рис. 1);

$$f_v = \frac{1}{N} \frac{dN}{dv} = \frac{4}{\pi^{1/2}} \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-m_0 v^2 / 2kT}; \quad (3)$$

$$f_E = \frac{1}{N} \frac{dN}{dE} = \frac{2}{\pi^{1/2}} \frac{1}{kT} \left(\frac{E}{kT} \right)^{1/2} e^{-E/kT} \quad (4)$$

В общем случае поведение совокупности молекул РГ в трехмерном пространстве x - y - z описывается функцией распределения (ФР)

$$f(x, y, z, v_x, v_y, v_z) = \frac{dN}{dx dy dz dv_x dv_y dv_z}, \quad (5)$$

которая выражает концентрацию частиц, находящихся в момент времени внутри элементарного объема $dx dy dz$ и имеющих составляющие скорости движения в интервале от v_x, v_y, v_z до $v_x + dv_x, v_y + dv_y, v_z + dv_z$.

Зная ФР совокупности Мл, можно легко получить другие характеристики газа. В частности, молекулярная концентрация рассчитывается интегрированием (5) по всему диапазону скоростей частиц (от $-\infty$ до $+\infty$):

$$n = \iiint_{-\infty}^{+\infty} f dv_x dv_y dv_z = \int f d\vec{v}. \quad (3)$$

Для вычисления числа Мл, падающих в единицу времени на единичную площадь стенки, т. е. плотности потока, в подынтегральное выражение необходимо ввести модуль проекции скорос-

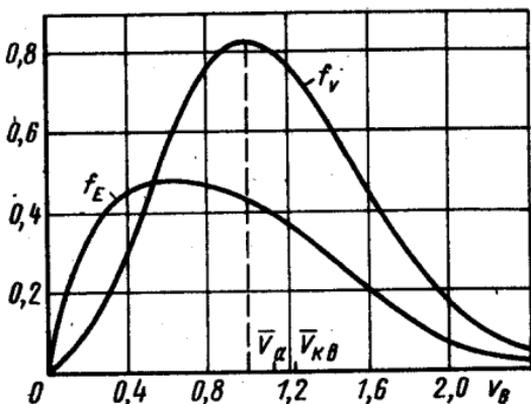


Рис. 1. Распределение скоростей и кинетической энергии молекул равновесного идеального газа (см. также табл. 1):

значения по оси абсцисс отложены в единицах наиболее вероятной скорости $v_g = \left(\frac{2kT}{m_0}\right)^{1/2}$;

средняя арифметическая скорость $\bar{v}_a = 1,13 v_g$;

средняя квадратичная скорость $\bar{v}_{кв} = 1,23 v_g$

тей Мл на нормаль к стенке $|v_n|$, а пределы интегрирования ограничить только отрицательными значениями v_n

$$\nu = \iiint_{v_n < 0} |v_n| f d\vec{v}. \quad (7)$$

Конкретный вид ФР определяется из решения интегро-дифференциального уравнения Больцмана (кинетического уравнения). При отсутствии внешних сил, действующих на Мл (типичная ситуация для вакуумных систем (ВС)!), кинетическое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v_x \frac{\partial f}{\partial x} + v_y \frac{\partial f}{\partial y} + v_z \frac{\partial f}{\partial z} = \iint |v_{отн}| (ff'^* - ff^*) dx d\bar{v}^*, \quad (8)$$

где стоящий в правой части интеграл выражает собой скорость изменения ФР в данной точке в результате межмолекулярных столкновений. Отдельные символы в уравнении (8) имеют следующий смысл: $|v_{отн}| = \sqrt{(v_x - v_x^*)^2 + (v_y - v_y^*)^2 + (v_z - v_z^*)^2}$ — модуль относительной скорости Мл, участвующих в столкновении; x — параметр столкновения, определяемый используемой моделью взаимодействия Мл (например, абсолютно упругий удар, потенциальное взаимодействие и т. п.). Звездочка сверху отмечает характеристики Мл, сталкивающихся с данными; штрихами отмечены значения функций и параметров после столкновения.

Кинетическое уравнение может быть также выражено в интегральной форме. В этом случае, обозначив через \vec{r} радиус-вектор некоторой точки пространства внутри вакуумной камеры (ВК), можно записать

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t) = f[\vec{r} - \vec{v}(t - t_0), \vec{v}, t_0] \exp \left\{ - \int_{t_0}^t \omega[\vec{r} - \vec{v}(t-s), \vec{v}, s] \times \right. \\ \left. \times ds \right\} + \int_{t_0}^t \vec{N}[\vec{r} - \vec{v}(t-s), \vec{v}, s] \times \exp \left\{ - \int_s^t \omega[\vec{r} - \vec{v}(t-s), \vec{v}, s] ds \right\} ds, \quad (9)$$

$$\omega = \iint |v_{отн}| f^* dx d\bar{v}^*; \quad \vec{N} = \iint |v_{отн}| f' \times f'^* dx d\bar{v}^*,$$

t_0 — время, необходимое для перемещения Мл, находящейся в точке \vec{r} и имеющей скорость \vec{v} , до стенки камеры.

Кинетическое уравнение носит фундаментальный характер и является основным уравнением молекулярно-кинетической теории. Как показано в разд. III, оно служит основой наиболее общих методов анализа параметров и синтеза вакуумных систем (ВС).

При выполнении условия $ff'^* = ff^*$ в формуле (8) ФР не зависит ни от координаты, ни от времени (распределение Максвелла). Газ в этом случае изотропен и находится в стационарном состоянии; приведенные выше выражения для функций f_v и f_E справедливы именно для этого случая. Давление, оказываемое таким газом на стенки замкнутого сосуда, одинаково во всех направлениях (поле давлений однородно!) и выражается зависимостью

$$p = nkT. \quad (10)$$

Плотность потока Мл на стенку в этом случае

$$v = \frac{1}{4} n \bar{v}_a = 3,51 \cdot 10^{22} \frac{P_{(мм рт. ст.)}}{(MT)^{0,5}}, \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (11)$$

а его "объем" V_0 :

$$V_0 = \frac{v}{n} = \frac{\bar{v}_a}{4} = 3,64 \left(\frac{T}{M} \right)^{0,5}, \frac{\text{л}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}. \quad (12)$$

Средняя длина свободного пробега λ между двумя последовательными соударениями с другими частицами

$$\lambda = \frac{\Lambda}{\rho}, \quad (13)$$

где Λ - коэффициент, зависящий от рода газа и его температуры (табл. 1). В частности, для воздуха при произвольных значениях ρ и T

$$\lambda = \frac{2,09 \cdot 10^{-2}}{\rho \text{ мм рт.ст.}} \left(\frac{T}{298} \right)^2 \frac{1}{T + 112}, \text{ м.}$$

Тепловое движение Мл приводит к тому, что любая выбранная группа частиц непрерывно перемещается в пространстве. Кинетика этого движения вдоль произвольно выбранной оси x описывается уравнением диффузии

$$\frac{dn}{dt} = D_0 \frac{d^2 n}{dx^2}, \quad (14)$$

где коэффициент самодиффузии $D_0 = 0,447 \bar{v}_a \lambda$. Среднее значение смещения выбранной группы частиц в интервале времени $0-t$

$$\bar{x}_a = 2 \left(\frac{D_0 t}{\pi} \right)^{0,5}.$$

Некоторые физические константы

Газ	M	Z	$10^{26} m_0$, кг	ρ_0 , кгс/м ³	γ , лс ⁻¹ см ⁻²			$10^2 \bar{v}_a$, м/с	
					77 К	298 К	700К	77 К	298 К
H ₂	2,016	1	0,335	0,082	22,482	44,202	67,810	8,993	17,679
D ₂	4,029	1	0,669	0,165	15,902	31,287	47,949	6,360	12,514
T ₂	6,034	1	1,002	0,247	12,995	25,564	39,181	5,198	10,225
He ³	3,017	2	0,501	0,123	18,379	36,154	55,425	7,351	14,461
He ⁴	4,003	2	0,665	0,164	15,960	31,396	48,094	6,384	12,558
CH ₄	16,043	-	2,663	0,656	7,971	15,680	24,033	3,188	6,273
NH ₃	17,031	-	2,827	0,696	7,734	15,218	23,323	3,094	6,089
H ₂ O	18,015	-	2,992	0,737	7,520	14,796	22,676	3,008	5,919
Ne	20,183	10	3,351	0,825	7,105	13,981	21,428	2,842	5,594
CO	28,011	-	4,651	1,145	6,032	11,867	18,186	2,413	4,746
N ₂	28,013	7	4,652	1,146	6,028	11,866	18,183	2,411	4,745
Воз- дух	28,98	-	4,811	1,185	5,930	11,663	17,881	2,372	4,665
O ₂	31,999	8	5,313	1,309	5,643	11,100	17,019	2,257	4,442
F ₂	37,997	9	6,309	1,554	5,177	10,194	15,614	2,071	4,077
A ₂	39,948	18	6,631	1,633	5,053	9,935	15,232	2,021	3,976
CO ₂	44,010	-	7,308	1,780	4,813	9,466	14,508	1,921	3,787
SO ₂	64,063	-	10,640	2,620	3,987	7,844	12,031	1,595	3,139
Cl ₂	70,906	17	11,770	2,900	3,791	7,458	11,431	1,516	2,984
Kr	83,800	36	13,900	3,423	3,490	6,865	10,521	1,396	2,747
Xe	131,300	54	21,800	5,369	2,786	5,483	8,400	1,114	2,193

Z - заряд ядра; ρ_0 - плотность при н.у. (760 мм.рт.ст.; 298 К); δ - диаметр молекул;
 $\rho = 760$ мм рт.ст.

ВУ некоторых типов содержат поверхности (Пв), поглощающие с вероятностью β падающие на них Мл. Иногда в ВК содержатся источники газа, создающие строго ориентированный в пространстве поток Мл. В обоих этих случаях движение Мл приобретает направленный характер, поле давлений теряет свою однородность, и выражения (10) - (12) лишаются однозначности. Анализ течения РГ в подобных системах с использованием категории "давление" физически неправомерен.

2. РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОВ В ТРУБОПРОВОДАХ

В зависимости от соотношения между λ и характеристическим размером трубопровода (Tr) различают турбулентный, вязкостный, промежуточный и молекулярный режимы течения. Критерием режима течения является число Кнудсена

$$Kn = \frac{\lambda}{a} \quad (15)$$

Таблица 1

и характеристики индивидуальных газов

$10^{-2} v_d, \text{ м/с}$	$10^{30} \theta, \text{ м}$	С, к	$\lambda \cdot 10^5, \text{ м.мм рт.ст.}$			$D_0, \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$		
			77 К	298 К	700 К	77 К	298 К	700 К
27,123	2,419	84,4	1,463	9,247	24,874	0,082	0,962	3,901
19,178	2,475	65,9	1,580	9,288	24,347	0,066	0,684	2,906
15,671	2,475	66	1,578	9,285	24,344	0,054	0,559	2,374
22,168	2,071	26	3,123	14,880	36,160	0,135	1,267	5,170
19,236	1,894	97,6	2,205	14,577	39,895	0,083	1,078	4,519
9,612	3,226	162	0,555	4,322	12,727	0,010	0,160	0,721
9,329	2,702	472	0,345	3,681	13,344	0,006	0,132	0,733
9,070	2,520	659	0,296	3,404	13,226	0,005	0,119	0,707
8,571	2,375	56	1,842	10,366	26,782	0,031	0,342	1,352
7,274	3,241	100	0,742	4,945	13,575	0,011	0,138	0,582
7,273	3,210	105	0,736	4,978	13,751	0,010	0,139	0,589
7,152	3,152	112	0,736	5,080	14,152	0,010	0,140	0,596
6,807	3,071	110	0,783	5,376	14,941	0,010	0,141	0,599
6,245	3,279	106	0,703	4,768	12,856	0,009	0,115	0,497
6,093	3,018	133	0,722	5,272	15,051	0,009	0,123	0,540
5,803	3,427	233	0,380	3,320	10,425	0,004	0,074	0,356
4,812	3,817	306	0,248	2,352	8,790	0,002	0,043	0,116
4,572	3,650	351	0,242	2,394	8,155	0,002	0,042	0,220
4,208	3,233	188	0,499	4,074	12,303	0,004	0,066	0,306
3,360	3,564	252	0,331	2,962	9,441	0,002	0,038	0,189

C — постоянная Сезерленда; D_0 — коэффициент самодиффузии при

При $Kn \ll 1$ (вязкостный, очень редко турбулентный режим) характер движения газа в основном определяется межмолекулярными процессами, и влияние стенок незначительно. Газ в этом случае ведет себя как вязкая жидкость. С достаточной точностью к нему приложимы законы гидродинамики, в частности, условие неразрывности струи и уравнение Пуазейля.

При $Kn > 1$ (молекулярный режим) движение газа представляет собой независимое друг от друга перемещение Ml , ограниченное практически только соударениями со стенками.

В промежуточном режиме (условный интервал этого режима $0,01 < Kn < 1$) характер движения определяется столкновениями обоих типов.

В высоковакуумных устройствах и аппаратах вязкостный и промежуточный режимы существуют лишь на этапе форвакуумной откачки (рис. 2).

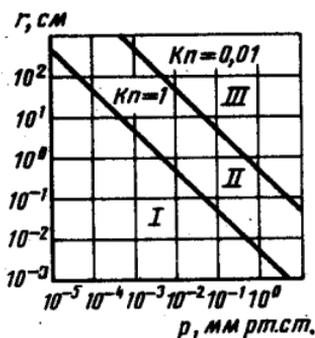


Рис. 2. Режимы течения воздуха при $T = 298$ К в цилиндрическом трубопроводе радиуса r в зависимости от давления:

I — область молекулярного режима; II — область промежуточного режима; III — область вязкостного режима

Количественная связь между потоком газа, проходящим через сечение Tr , в котором существует давление p , $Q = p \frac{dV}{dt}$ и давлением во входном (p_1) и выходном (p_2) сечениях Tr выражается зависимостью

$$Q = G (p_1 - p_2), \quad (16)$$

где величина G называется пропускной способностью (ПС) или проводимостью трубопровода.

В вязкостном режиме формула (16) непосредственно отражает физическую сущность течения газа как движения квази сплошной среды под действием внешней силы. В молекулярном режиме эта формула описывает лишь удобную математическую модель, поскольку движущей силой течения является не последовательная передача импульса вдоль Tr смежными слоями газа под действием внешней силы, а "естественное" тепловое движение отдельных Ml .

Для определения полной ПС трубопроводов, соединенных последовательно, приближенно справедливо равенство

$$\frac{1}{G_{\text{посл}}} = Z_{\text{посл}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{G_i} = \sum_{i=1}^n Z_i. \quad (17a)$$

При параллельном соединении трубопроводов

$$G_{\text{парал}} = \sum_{i=1}^n G_i. \quad (17b)$$

Величину $Z = \frac{1}{G}$ принято называть сопротивлением трубопровода.

В вязкостном режиме ПС зависит от геометрии Тру и параметров состояния протекающего газа. Для ее определения справедлива формула

$$G = \frac{\kappa}{\eta l} \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (18)$$

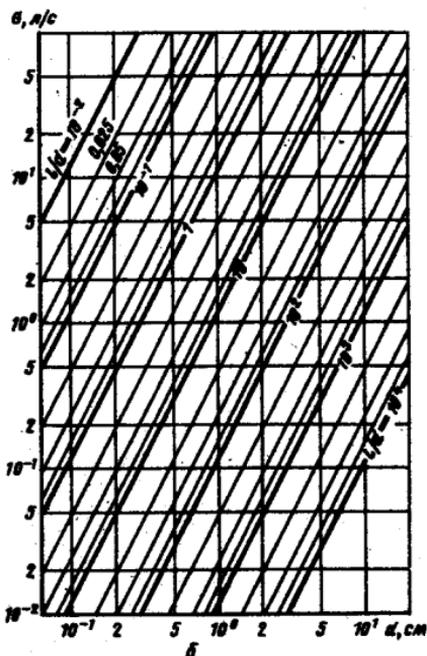
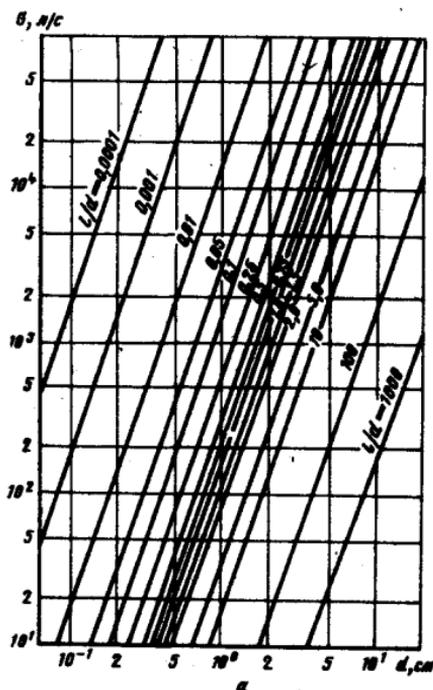
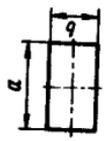


Рис. 3. Пропускная способность цилиндрического трубопровода длиной l и диаметром d для воздуха при $T = 298$ К в различных режимах течения:

а — для вязкостного режима при $\frac{p_1 + p_2}{2} = 1$ мм рт.ст.; б — для молекулярного режима

Пропускная способность^{*} длинных трубопроводов с различной формой поперечного сечения (линейные размеры указаны в см)

Форма поперечного сечения трубопровода	вязкостный		Режим течения газа		молекулярный				
	общая формула	формула для воздуха	формула для воздуха	общая формула	формула для воздуха				
	$G = 1,21 \cdot 10^{19} \frac{\delta_T^2 (T/M)^{0,5}}{T} \times \frac{d^4}{l}$	77 К	298 К	700 К	77 К	298 К	700 К		
	$G = 1,21 \cdot 10^{19} \frac{\delta_T^2 (T/M)^{0,5}}{T} \times \frac{d^4}{l} \left[\frac{d_1^4 - d_2^4}{(d_1^2 - d_2^2)^2} - \frac{1}{\ln(d_2/d_1)} \right]$	A=6,22·10 ²	A=1,77·10 ²	A=0,97·10 ²		A=6,21	A=12,22	A=18,72	
	$G = 2,41 \cdot 10^{21} \frac{\delta_T^2 (T/M)^{0,5}}{T} \times \frac{1}{l} \frac{\pi^3 m^3}{\pi^2 + m^2}$	A=6,22·10 ²	A=1,77·10 ²	A=0,97·10 ²		A=6,21	A=12,22	A=18,72	

	$G = 4,09 \cdot 10^{10} \frac{d_2^{1,75} (1/M)^{0,5}}{a^3 b} \Psi(b/a);$ $\Psi(b/a) = \left[1 - \frac{192 a}{\pi^5 b} \times \left(\frac{11b}{2a} + \frac{1}{3^2} \ln \frac{37b}{2a} \right) \right]$	$G = A \frac{a^3 b}{l} \Psi(b/a)$	$G = 2,70 k'' (T/M)^{0,5} \times \frac{a^2 b^2}{(a+b)} \frac{1}{l}$	$G = A k'' \frac{a^2 b^2}{a+b} \frac{1}{l}$	
	$A = 2,11 \cdot 10^3$	$A = 6,01 \cdot 10^2$	$A = 3,31 \cdot 10^2$	$A = 15,81$	$A = 31,10$

\times ПС трубопроводов в вязкостном режиме условно указана в единицах л/с (мм рт.ст.); для получения истинного значения G результат расчета по этим формулам необходимо умножить, как это видно из формулы (18), на среднее арифметическое из давлений P_1 и P_2 , выраженное в мм рт.ст.; ПС трубопроводов в молекулярном режиме указана в л/с.

получаемая из уравнения Пуазейля. В этой формуле k - коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения Тр.

В молекулярном режиме ПС зависит только от геометрии Тр и температуры РГ и определяется формулой Кнудсена

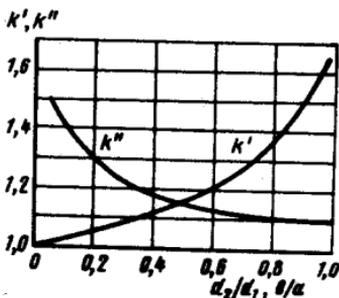
$$G = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{a}}{\int_0^l \frac{\Pi}{F^2} dx}, \quad (19)$$

где Π, F - периметр, площадь поперечного сечения Тр.

В промежуточном режиме ПС сложным образом зависит от геометрии Тр и параметров состояния протекающего газа. Поскольку этот режим не характерен для высоковакуумных систем, расчеты G в промежуточном режиме выполняются крайне редко; они требуют обычно громоздких вычислений.

Сводка формул и графиков для определения ПС длинных ($l \gg d$) трубопроводов наиболее распространенных сечений в вязкостном и молекулярном режимах приведена в табл. 2 и на рис. 3 (только для воздуха при $T = 298$ К). Для пересчета ПС на другие газы и температуры величины, полученные из рис. 3, должны быть умножены на поправочные коэффициенты, приведенные в табл. 3.

Методы определения ПС коротких Тр и других элементов вакуумных систем (ЭВС) малой осевой протяженности описаны в разд. II.



**Коэффициенты пересчета пропускной способности
цилиндрических трубопроводов
по воздуху при Т=298 К (см. рис.3) на другие газы и температуры**

Газ	Вязкостный режим			Молекулярный режим		
	77 К	298 К	700 К	77 К	298 К	700 К
H ₂	6,349	2,082	1,182	1,927	3,793	5,811
D	3,910	1,467	0,811	1,383	2,681	4,110
T	3,192	1,199	0,663	1,114	2,192	3,359
He ³	2,563	1,058	0,609	1,576	3,099	4,749
He ⁴	3,150	0,938	0,524	1,367	2,691	4,124
CH ₄	6,249	1,580	0,822	0,683	1,343	2,060
NH ₃	9,772	1,800	0,761	0,663	1,305	1,999
H ₂ O	11,081	1,892	0,746	0,645	1,268	1,944
Ne	1,680	0,587	0,348	0,609	1,198	1,837
CO	3,537	1,045	0,583	0,517	1,017	1,559
N ₂	3,569	1,038	0,576	0,517	1,017	1,559
Воздух	3,511	1,0	0,550	0,508	1,0	1,533
O ₂	3,138	0,899	0,496	0,484	0,952	1,458
F ₂	3,206	0,930	0,503	0,444	0,873	1,338
Ar	3,045	0,821	0,441	0,433	0,852	1,306
CO ₂	5,519	1,242	0,606	0,412	0,812	1,244
SO ₂	7,015	1,453	1,284	0,342	0,673	1,031
Cl ₂	6,811	1,357	0,610	0,325	0,639	0,980
Kr	3,046	0,734	0,371	0,299	0,588	0,902
Xe	3,669	0,806	0,387	0,239	0,470	0,712

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Любая ВС включает откачиваемую вакуумную камеру с размещенным в ней технологическим или экспериментальным оборудованием, группу присоединенных к ней или встроенных вакуумных насосов (ВН), коммутирующую и регулирующую арматуру и средства контроля и измерения параметров разреженной газовой среды. Поведение этой среды однозначно определяется набором ряда характеристик, описывающих отдельные ЭВС или их совокупность. Важнейшими из этих характеристик являются:

а) для ВК – объем, поверхность, линейные размеры, температурное поле, поле десорбционных и диффузионных потоков; для

ВН - предельное остаточное давление, производительность, быстрота действия (БД), коэффициенты использования;

б) для соединительных трубопроводов, арматуры и других ЭВС - пропускная способность, температурное поле, поле десорбционных и диффузионных потоков;

в) для системы "насос - трубопровод - камера" - быстрота откачки (БО), газокинетическая постоянная;

г) для системы "технологическое (экспериментальное) оборудование - вакуумная камера" - топография, парциальный состав и кинетика газовой нагрузки.

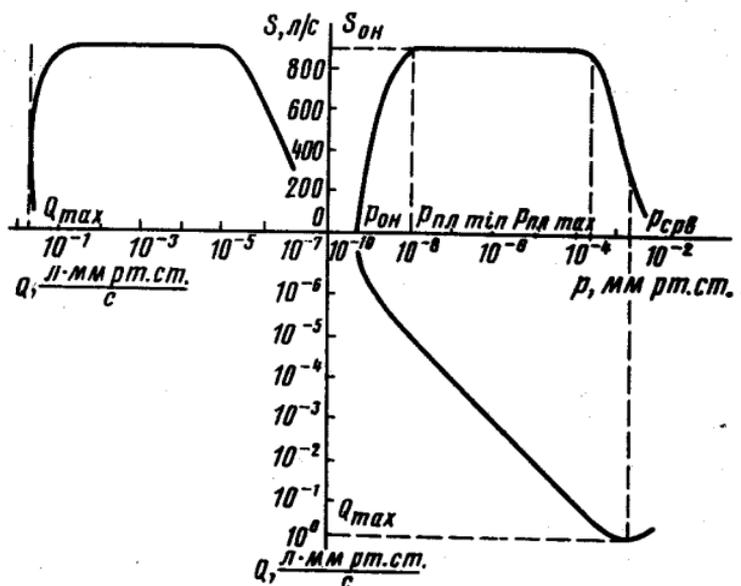


Рис. 4. Типовая рабочая диаграмма высоковакуумного насоса:

$p_{пл\ min} - p_{пл\ max}$ - диапазон давлений, в котором $S_{0H} = const$; $p_{срв}$ - давление срыва. (максимальное давление устойчивой работы насоса)

Приведенный набор характеристик, как уже отмечалось, далеко не достаточен для описания и расчета неоднородных и неравновесных ВС. Но для большинства сравнительно несложных ВС он допускает наглядную интерпретацию и дает простые аналитические соотношения. Остановимся более подробно на некоторых из этих характеристик.

Быстрота действия насоса определяет объем газа, проходящий через входное сечение F_H в направлении откачки за единицу времени. В общем случае БД представляет собой разность между потоками газа, проходящими через входное сечение в обоих направлениях - в насос (прямой поток) и из него

(обратный поток), — отнесенную к давлению в этом сечении p_H . Минимальный обратный поток может быть вычислен по формуле $Q_{обр} = p_{OH} V_0 F_H$, где p_{OH} — некоторое равновесное давление, называемое предельным остаточным давлением ВН. Поскольку прямой и обратный потоки уменьшаются по мере снижения p_H , эта разность зависит от давления (рис. 4), обращаясь в нуль при достижении условия $p_H = p_{OH}$. Отсюда следует простое выражение для S_H в области, близкой к p_{OH} :

$$S_H = S_{OH} \left(1 - \frac{p_{OH}}{p_H}\right). \quad (20a)$$

В области давлений, близких к максимальным, зависимость $S_H = f(p)$ описывается эмпирическим выражением

$$S_H = S_{OH} \left[1 - \exp\left(-\frac{p^*}{p_H}\right)\right]. \quad (20b)$$

Параметр p^* для насосов различных типов приведен в табл. 4.

Поток газа, откачиваемый насосом и называемый его производительностью, определяется очевидным выражением

$$Q = S_H p_H. \quad (21)$$

Сопоставляя выражения (20) и (21), связь между основными характеристиками ВН, нагруженного газовым потоком Q , можно записать в виде

$$p_H = p_{OH} + \frac{Q}{S_{OH}}. \quad (22)$$

Рассматривая квазистационарную систему "Насос (быстрота действия S_H) — трубопровод (пропускная способность G) — компактная ВК (объем V , давление p)", условие сохранения массы откачиваемого газа вдоль тракта откачки можно представить в виде

$$Q = pS = G(p - p_H) = p_H S_H,$$

$$\text{откуда} \quad \frac{1}{S} = \frac{1}{S_H} + \frac{1}{G}, \quad (23)$$

где S — быстрота откачки камеры, т. е. количество газа в объемных единицах, проходящее за единицу времени через сечение "ВК-Тр".

Формула (23) описывает одно из важнейших положений "классической" вакуумной техники, выражая непосредственную зависимость эффективности откачки ВК выбранным насосом от пропускной способности соединительного трубопровода.

Усредненные значения параметра R^M для высоковакуумных насосов различных типов

Насосы		$S_{\text{эф}}, \text{л/с}$				
Тип	Фирма, марка	10-100	100-1000	10^3-10^4	10^4	
Компримирующие	диффузионные	-	(1,9-0,8)·10 ³	(1,6-0,9)·10 ³	0,5·10 ³	
	паромасляные	4,9·10 ³	(1,8-1,5)·10 ³	(2,0-1,5)·10 ³	(1,2-0,9)·10 ³	
	турбомолекулярные	-	1,4·10 ³	(1,5-0,7)·10 ³	-	
Насосы поверхностного действия	ТМН	-	3,6·10 ⁴	-	-	
	Balzers	-	(7,6-10)·10 ³	(7,6-3)·10 ³	-	
	Leybold	-	(3,2-4,4)·10 ³	(5-6)·10 ³	-	
	магнитные	8·10 ⁵	-	7·10 ⁵	-	
	электроразрядные	2,8·10 ⁵	(2,5-3,2)·10 ⁵	-	-	
	ионно-Getterные испарительные	7·10 ⁵	(7-5)·10 ⁵	-	-	
ТИН	-	6,3·10 ⁵	(4,2-3,7)·10 ⁵	-		
НИБ	-	-	(9-1,6)·10 ⁵	2,7·10 ⁵		

Усредненные значения коэффициентов использования высоковакуумных насосов в рабочих режимах вакуумных приборов, установок и аппаратов различного назначения

Тип вакуумной установки	Коэффициенты использования	
	η_d	η_s
Откачные посты для откачки ЭВП	$5 \times 10^{-3} - 0,8$	0,1-0,5
Печи для электротермической обработки в вакууме	$10^{-2} - 0,8$	0,5-0,7
Электронные микроскопы	$10^{-2} - 10^{-1}$	0,2-0,4
Экспериментальные термоядерные установки	$10^{-4} - 0,5$	-
Имитаторы космического пространства	$10^{-2} - 0,5$	0,5-0,9
Установки космического материало-ведения	$10^{-2} - 0,3$	0,5-0,8
Ускорители заряженных частиц для физических исследований	$10^{-4} - 0,5$	-
Ускорители заряженных частиц прикладного применения	$10^{-2} - 10^{-1}$	0,1-0,3

Использованное выше понятие "компактная ВК" означает, что характеристические размеры камеры в трехмерной системе координат близки друг к другу.

В нестационарном приближении БО, сохраняя свой смысл как количество проходящего через сечение "ВК-Тр" за единицу времени газа, выраженное в объемных единицах, может рассматриваться так же как скорость изменения объема откачиваемого газа

$$s = \frac{dV}{dt}, \quad (24)$$

что непосредственно следует из условия сохранения массы газа в системе "камера-насос"

$$\frac{d(pV)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = 0. \quad (25)$$

Уравнение баланса газа в откачиваемой ВК, как это видно из (25), описывается формулой

$$pS = -V \frac{dp}{dt}, \quad (26)$$

интегрирование которой в интервале давлений $p - p_{OH}$ дает кинетическую зависимость для давления в камере

$$p(t) = p_{OH} + (p - p_{OH}) \exp(-t / \tau_{гк}), \quad (27)$$

где $\tau_{гк} = V/S$ - газокинетическая постоянная (постоянная времени откачки), равная времени, в течение которого давление в камере падает в e раз.

Продолжительность откачки камеры до давления $p(t)$

$$\Delta t = 2,303 \frac{V}{S} \lg \frac{p - p_{ок}}{p(t) - p_{ок}} \quad (28)$$

Безразмерные коэффициенты использования ВН дают представление об эффективности реализации его откачивающих свойств и конкретных ВУ (табл. 5). Для этой цели могут применяться коэффициент использования производительности насоса η_a (отношение откачиваемого насосом газового потока Q к его максимальной производительности Q_{max} , см. рис. 4)

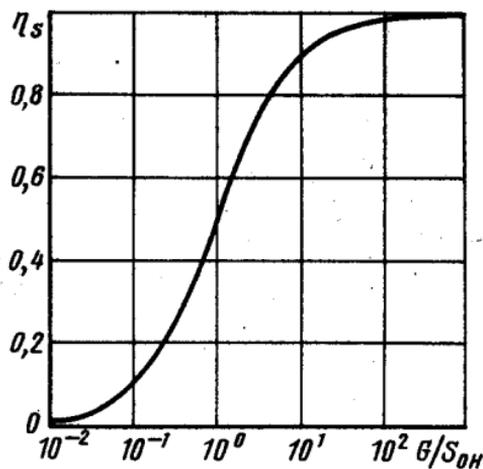


Рис. 5. Коэффициент использования быстроты действия насоса, соединенного с компактной ВК трубопроводом с пропускной способностью G

и коэффициент использования быстроты действия насоса η_s (отношение быстроты откачки камеры S к величине S_{0H})^{*}. Как видно из формулы (23), $\eta_s = \frac{1}{S_{ВН}/G + 1}$ (рис. 5). Очевидно, что использование коэффициента η_s имеет смысл лишь в системах с компактными ВК.

Как видно из типовой рабочей диаграммы высоковакуумного насоса (ВВН), в режиме $\eta_a = 15 \frac{1}{S_H} < S_{0H}$ (см. рис. 4); поэтому одновременное достижение максимальных значений η_a и η_s невозможно.

Остальные из названных характеристик не требуют пояснений.

При анализе более сложных ВС используются дополнительные дифференциальные и интегральные характеристики. Их ряд включает, прежде всего, статистически детерминированные константы взаимодействия M_l со стенкой в данной ее области, т.е.

* Иногда коэффициент использования η_s понимают как отношение S/S_H

характеристики элементарных взаимодействий. К числу важнейших из этих констант относятся:

коэффициент прилипания, определяющий вероятность длительного удержания поверхностью упавшей на нее чужеродной Мл (характеристика элементарного акта сорбции);

коэффициент конденсации, определяющий вероятность длительного удержания поверхностью упавшей на нее однородной Мл (характеристика акта конденсации). Для упрощения записи коэффициенты прилипания и конденсации обозначены одной буквой β ;

коэффициент стимулированного газовыделения γ , определяющий среднее количество десорбируемых с поверхности газовых частиц под влиянием упавших на нее "быстрой" Мл, иона, электрона или фотона;

коэффициент отражения ρ , определяющий вероятность того, что частица, упавшая на поверхность, после пребывания на ней в течение времени порядка периода колебания кристаллической решетки ($\sim 10^{-13}$ с) покинет эту поверхность.

Для придания приводимым формулам достаточной общности независимо от конкретной модели взаимодействия "частица - стенка" в дальнейшем использован обобщенный безразмерный параметр τ , равный отношению числа эмитируемых данных участком поверхности частиц к количеству падающих на нее (табл. 6).

Интегральные характеристики описывают взаимодействия совокупности Мл с некоторым набором поверхностей. К числу основных из этих характеристик относятся:

коэффициент проводимости P , определяющий вероятность пролета молекул в заданном направлении через рассматриваемый ЭВС (трубопровод, клапан и т. п.) и численно равный отношению количества Мл, вылетающих из выходного отверстия ЭВС, к числу Мл, влетевших во входное отверстие за то же время;

коэффициент захвата Γ , определяющий среднюю для совокупности частиц вероятность быть поглощенными стенками рассматриваемого ЭВС (насоса, ловушки и т. п.) и численно равный отношению количества оставшихся в этой структуре Мл к числу влетевших туда за то же время;

коэффициент возврата Δ , определяющий среднюю вероятность для совокупности Мл, покинувших участок ВС, вернуться на этот же участок.

Приведенный набор характеристик позволяет построить замкнутую систему уравнений, однозначно описывающих поведение РГ в любой ВС без использования таких категорий "классичес-

Взаимосвязь параметра Γ с константами взаимодействия
"частица-стенка"

Модель взаимодействия	Константа взаимодействия	Численное значение Γ
Сорбция	$\beta \leq 1$	$1 - \beta$
Конденсация	$\beta \leq 1$	$1 - \beta$
Отражение, рассеяние	$\rho \leq 1$	ρ
Стимулированное газовыделение	$\gamma \leq 1$	γ

кой" ВТ как давление, БД насосов, БО, ПС трубопроводов и производных от них.

В инженерной практике в ряде случаев удобно применять смешанный набор характеристик, учитывая связывающие их соотношения. В частности, для равновесных термодинамически однородных ВС с относительно малой площадью входного отверстия ВВН можно записать:

$$S_H = V_D F_H \Gamma = 3,64 \left(\frac{T}{M} \right)^{0,5} F_H \Gamma ; \quad (29)$$

$$S_D = \beta V_D ; \quad (30)$$

$$G = V_D F_{TP} P = 3,64 \left(\frac{T}{M} \right)^{0,5} F_{TP} P, \quad (31)$$

где F_H, F_{TP} - площадь входного отверстия ВВН, T_{TP} ;

S_D - БД единицы поглощающей газ поверхности.

Применять эти формулы следует, однако, с осторожностью, каждый раз анализируя степень их физической обоснованности для рассматриваемой ВС.

4. ПРИНЦИПЫ КЛАССИФИКАЦИИ И СОДЕРЖАНИЕ ПРОЕКТНОЙ РАЗРАБОТКИ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

С расчетно-методической точки зрения ВС приборов, установок и аппаратов могут быть двух типов. Проектирование систем первого типа (для них иногда применяется определение "простые") может быть выполнено чисто "классическими" методами, т. е. с использованием зависимостей, связывающих параметры состояния откачиваемого газа, интегральные характе-

ристики откачных средств (БД) и структурно-геометрические характеристики ЭВС (форма, размеры, ПС). Неизбежным следствием такого подхода, подробно рассматриваемого в разд. II, является осреднение ряда расчетных характеристик, в частности, давления. Необходимо подчеркнуть условность применения к таким системам термина "простые": по компоновке и используемым конструктивно-технологическим решениям они могут характеризоваться высокой степенью геометрической сложности и разветвленности.

При проектировании систем второго типа (назовем их условно "сложными") классические методы дают лишь очень грубые приближения; в некоторых случаях они вообще неприменимы. К таким системам, как уже отмечалось, относятся структуры с существенно неоднородными полями сорбционных, десорбционных и температурных характеристик; устройства, содержащие источники направленных молекулярных потоков (МлП), а также пучков заряженных частиц и электромагнитного излучения (при условии, если они влияют на остаточный газ, десорбционные или температурные характеристики); незамкнутые структуры и т. д. Аналитические методы расчета сложных систем базируются на использовании дифференциальных характеристик поверхностей (параметр T), включаемых как заданное в систему интегро-дифференциальных уравнений переноса массы (т. е. молекул РГ) внутри ВС. В криовакуумных системах одновременно должны, как правило, анализироваться закономерности распространения лучистых потоков, поскольку потоки могут существенно влиять на условия массопереноса, в особенности, на величину β . Такой подход в принципе позволяет дать сколь угодно детальное описание параметров РГ внутри ВС и, одновременно, получить интегральные характеристики любого ее элемента (например, коэффициенты Γ , P , Δ и т. п.). Очевидно, что этот подход универсален и применим также к "простым" системам. В большинстве случаев, однако, его применение к этим системам не оправдано ввиду большого объема вычислительных работ.

В приложении к стационарным системам столь же общий характер носит численный метод Монте-Карло (ММК), в рамках которого при проектировочном расчете прослеживается движение каждой из выбранной совокупности Мл. Особенности расчета и проектирования сложных ВС подробно рассматриваются в разд. III.

Дальнейшая детализация типа проектируемой ВС может вестись по различным классификационным критериям. Важнейшими из них являются необходимая степень разрежения (рабочее

давление (РД) остаточных газов p_p), газокинетический режим и структурные особенности.

По величине РД в приборах, установках и аппаратах их ВС делятся на форвакуумные ($p_p > 10^{-3}$ мм рт. ст.), высоковакуумные (10^{-7} мм рт. ст. $< p_p < 10^{-3}$ мм рт. ст.) и сверхвысоковакуумные ($p_p < 10^{-7}$ мм рт. ст.). Величина РД определяет тип откачного и измерительного оборудования и арматуры, выбор конструкционных материалов и вакуумно-технологические особенности изготовления, монтажа, наладки и эксплуатации аппаратуры.

Признаки, объединяемые понятием "газокинетический режим", определяют кинетику газовой нагрузки во время рабочего цикла и соответственно условия работы откачного и измерительного оборудования. Сюда входят величина газового потока, натекающего в ВК, и газовой нагрузки на средства откачки в зависимости от времени, глубина их вариаций во время рабочего цикла и соотношение между величинами $\tau_{гк}$ и τ_p (характеристическое время рабочего процесса). Если во время рабочего цикла средства откачки отсоединены от ВК и их роль сводится к созданию начального разрежения, то такие системы называют статическими. В вакуумном аппарато- и приборостроении статические системы используются сравнительно редко. Системы, работающие в режиме непрерывной откачки, называются динамическими.

В зависимости от соотношения между $\tau_{гк}$ и τ_p газокинетический режим во время рабочего цикла в динамических системах может быть неустановившимся ($\tau_{гк}/\tau_p > 1$) и квазистационарным ($\tau_{гк}/\tau_p \ll 1$). Газокинетический режим влияет на выбор производительности откачных средств и устойчивость работы ВС.

По структурно-параметрическим особенностям ВС включают системы с сосредоточенными и распределенными параметрами (ВССП, ВСРП), а также системы смешанного типа. Распределенный характер могут носить как источники газовой нагрузки, так и средства откачки. Поскольку ВК некоторых приборов и аппаратов имеют периодическую структуру в виде следующих друг за другом геометрически подобных элементарных ячеек, то такие ВС можно рассматривать как системы с распределенным сопротивлением (пропускной способностью). Структурно-параметрические особенности определяют принципиальные схемные решения ВС, включая производительность используемых ВК, места их размещения и способы вакуумметрии, газоанализа и течеискания.

Конструктивные решения ВК и средств откачки определяют компоновочные особенности ВС. По этим признакам ВС делятся на системы с встроенными и автономными насосами. В системах с встроенными насосами последние конструктивно совмещены с ВК и размещаются непосредственно в ней. В ряде случаев, в особенности в установках научного приборостроения и в электровакуумных приборах, для работы встроенных насосов могут использоваться магнитные и электрические поля откачиваемых устройств (принцип интеграции вакуумного тракта), что позволяет существенно упростить систему откачки. Разновидностью ВС со встроенными насосами являются отпаянные вакуумные приборы и установки. В системах с автономными насосами последние представляют собой конструктивно независимые блоки и агрегаты, присоединенные к ВК.

Все указанные признаки, кроме компоновочных, к началу проектирования бывают обычно определены, поскольку они диктуются требованиями реализуемого технологического процесса. Компоновочные решения принимаются на последующих этапах разработки по результатам технико-экономических оценок различных вариантов.

Определение типа проектируемой ВС по сформулированным классификационным признакам позволяет конкретизировать цели и основное содержание проектной разработки.

Для простых ВССП проектирование сводится к расчету газовой нагрузки, выбору типа и определению параметров комплекса откачных средств (по лимитирующим критериям), выбору типа арматуры, средств вакуумметрии и течеискания, системы управления и оценке ожидаемых эксплуатационных характеристик изделия, включая временные характеристики, параметры устойчивости и надежности. Для сверхвысоковакуумных систем необходима также разработка вакуумно-технологического цикла изготовления, сборки и наладки изделия.

Для аналогичных систем с распределенными параметрами важными дополнительными этапами проектирования являются оптимизация системы откачки по технико-экономическим критериям, построение профиля давления (молекулярной концентрации) и эпюры газовых потоков по тракту, а также интегральная оценка влияния остаточного газа на ход технологического процесса. Для ВС, содержащих структурно-периодические ВК или Тр сложной геометрии, существенную часть проектировочных расчетов составляет расчет их ПС.

Для сложных ВС принципиальное значение приобретает анализ пространственного распределения газовых и лучистых потоков в проектируемой системе, являющейся основой ее опти-

мизации и правильности истолкования результатов вакуумметрических и масс-спектрометрических измерений.

Здесь сформулированы только исходные и наиболее общие принципы проектирования ВС. В зависимости от конкретного применения ВУ цели, содержание и критерии проекторочных расчетов могут видоизменяться и дополняться. Поскольку вопросам выбора оптимальных ЭВС (арматуры, средств вакуумметрии и т. п.) и их проектирования посвящены отдельные брошюры, то в этой брошюре они не рассматриваются.

II. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

1. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВОЧНОГО РАСЧЕТА

Правильность и степень оптимальности проектных решений зависят от полноты исходного технического задания на проектирование. В техническом задании должны быть приведены, как правило, следующие сведения:

назначение, принципы работы и основные количественные характеристики проектируемого изделия и реализуемого на нем технологического процесса;

временные характеристики подготовительного и рабочего циклов;

функциональная и предварительная компоновочная схемы ВС; конструктивные особенности специализированных ЭВС; требуемое (допустимое) давление остаточного газа и его парциальный состав;

диапазон возможных вариаций парциальных давлений компонентов остаточного газа;

источники, величина, парциальный состав и кинетика газового потока в ВК, требуемого для реализации технологического процесса;

возможные конструкционные материалы ВК, арматуры, специализированных ЭВС;

характеристики тепловых и электрических процессов в эксплуатационных режимах, влияющих на параметры ВС;

интенсивность и пространственно-временное распределение потоков корпускулярного и электромагнитного излучения, взаимодействующих с ЭВС;

способы и требуемые приборы измерения и управления ВС и изделием в целом;

условия эксплуатации изделия (климатические условия, ориентация в пространстве, уровень вибрации, характеристики механических нагрузок, степень доступности и т. п.);

предполагаемая укрупненная схема технологического процесса изготовления, монтажа и наладки ВС и изделия в целом; параметры надежности;

факторы, ограничивающие применение отдельных типов ВН, арматуры, измерительной аппаратуры и материалов; допустимые массо-габаритные характеристики; специальные и особые требования к ВС, вытекающие из назначения и особенностей проектируемого изделия.

Располагая указанными данными, можно переходить к расчету и проектированию ВС. Расчет и проектирование целесообразно производить в следующем порядке:

а) определить топографию, диапазон возможных величин, парциальный состав, временные зависимости газовых потоков в ВК и другие ЭВС, связанные с технологическим процессом и сопутствующими ему газокINETическими явлениями, и на этой основе выявить лимитирующие факторы и наиболее напряженные по газовой нагрузке участки ВС;

б) рассчитать необходимую быстроту откачки камеры S_{Σ} по наиболее характерным парциальным составляющим газовой нагрузки:

в квазистационарном режиме

$$S_{\Sigma \text{эф.ст}} = - \frac{\sum_j Q_j}{P_{\text{р.т.п}}}, \quad (32)$$

где суммирование ведется по всем источникам газовой нагрузки; $P_{\text{р.т.п}}$ - минимальное рабочее давление в камере, в переходном режиме

$$S_{\Sigma \text{пер}} = 2,303 \frac{V}{\Delta t_{\text{доп}}} \lg \frac{P_{\text{нач}} - P_{\text{ок}}}{P_{\text{р.нач}} - P_{\text{ок}}}, \quad (33)$$

где $\Delta t_{\text{доп}}$ - допустимая продолжительность откачки ВК в интервале давлений $P_{\text{нач}} - P_{\text{р.нач}}$ (подготовка рабочего цикла).

Большее из полученных значений ($S_{\Sigma \text{тах}}$) является базовым для дальнейших расчетов;

в) разработать блок-схему системы откачки, выбрать возможные типы ВН для всего интервала РД и определить области оптимальных давлений ($P_{\text{н.опт}}$) ВВН (для динамических квазистационарных ВС);

г) найти требуемую БД насосов по характерным парциальным компонентам газовой нагрузки в оптимальном квазистационарном режиме

$$S_{\Sigma \text{н.ст}} = \frac{\sum Q_j}{P_{\text{н.опт}}}; \quad (34)$$

д) сравнить полученные значения $S_{\Sigma \text{max}}$ и $S_{\Sigma \text{нст}}$, окончательно выбрать тип используемых ВН и уточнить компоновку ВС в соответствии со следующими критериями: при значительной разнице величин $S_{\Sigma \text{max}}$ и $S_{\Sigma \text{нст}}$ необходим переход на насосы с иным значением $P_{\text{н.опт}}$, при выполнении условия $S_{\Sigma \text{max}} \approx S_{\Sigma \text{нст}}$ необходима геометрическая оптимизация компоновки ВС, имеющая целью достижение максимальных коэффициентов использования насосов и минимальной стоимости откачного оборудования;

е) рассчитать ПС специализированных ЭВС, влияющих на распределение давления и газовых потоков в проектируемом изделии;

ж) выбрать ВВН (по скорости действия) из ряда имеющихся промышленных насосов (агрегатов) и уточнить схемы их размещения;

з) рассчитать парциальные и полные давления в ВК, ВВН и наиболее напряженных участках ВС на всех этапах подготовительного и рабочего циклов и в аварийных режимах, сравнить их с заданными и, при необходимости, откорректировать схемы откачки;

и) выбрать средства предварительной (форвакуумной) откачки из ряда имеющихся промышленных насосов (агрегатов), согласованных по производительности с ВВН, и уточнить схемы их размещения;

к) рассчитать коэффициенты использования насосов, оценить ресурс, параметры надежности и устойчивости ВС и другие характеристики, определяемые назначением и режимом эксплуатации изделия и типом средств откачки;

л) разработать полную принципиальную и компоновочную схемы ВС, включающие выбор типа и мест размещения вакуумметрической и масс-спектрометрической аппаратуры, коммутирующей арматуры и других ЭВС;

м) разработать требования к конструкции ВК и специализированным ЭВС, обеспечивающих расчетные параметры ВС;

н) разработать полный вакуумно-технологический цикл изготовления элементов ВС и изделия в целом, контроля герметичности деталей и сборочных единиц, сборки изделия и его ввода в эксплуатацию.

Указанный порядок изложен в приложении к ВССП. Особенности расчета ВСПП приведены в подразд. 5 разд. II.

2. ИСТОЧНИКИ ГАЗОВОЙ НАГРУЗКИ

Величина, парциальный состав и временные зависимости газовой нагрузки определяются характером реализуемого технологического процесса. К числу ее наиболее характерных компонентов относятся:

атмосферный воздух или другая газовая сфера, заполняющая изделие перед началом вакуумно-технологического процесса;

натекание из атмосферы через неустраненные и неконтролируемые течи;

газ, выделяющийся из обрабатываемых в вакууме деталей и материалов;

ГВ стенок ВК и расположенных в ней конструктивных элементов;

газ, напускаемый в ВК для организации технологического процесса;

диффузионные потоки сквозь стенки ВК, определяемые газопроницаемостью конструкционных материалов;

термодесорбционные газовые потоки с поверхности подогревателей и катодов электронно- и ионно-лучевых устройств, расположенных в ВК;

газовые потоки из ионных и плазменных источников, расположенных в ВК, возникающие вследствие неполного преобразования нейтральных газовых Мл, вводимых в источник, в ионы;

газовые потоки, образованные нейтрализующимися при соударении со стенками или в результате перезарядки ионами;

газовые потоки, образованные стимулированной десорбцией со стенок под действием корпускулярного и электромагнитного излучений;

выделение газа из микропор, газовых пузырей и других структурных неоднородностей при механических и электрических микроразрушениях деталей;

выделение растворенного в конструкционных материалах газа при локальном расплавлении, сублимации или распылении участков поверхности;

испарение конденсата в криовакуумных системах с переменной температурой стенок;

потоки газа, рассеиваемого при работе паро-газовых мишенной различного назначения.

Значимость каждого из перечисленных компонентов определяется назначением, конструктивно-технологическими особенностями и газокинетическим режимом проектируемой установки.

Потоки газа, выделяющегося из обрабатываемых в вакууме веществ и материалов, зависят от их исходного газосодержа-

ния (табл. 7), температуры, характера и продолжительности обработки и формы деталей. Они рассчитываются по уравнениям диффузии или определяются эмпирически.

Десорбционные потоки со стенок зависят от рода материала, площади поверхности изготовленной из этого материала детали и продолжительности вакуумирования установки. Суммарный поток теплового ГВ со стенок определяется по формуле

$$Q_{ГВ} = \sum_j \varphi_j F_j, \quad (35)$$

где суммирование проводится по всем j поверхностям, расположенным в вакууме; φ_j - удельная скорость ГВ данного материала (табл. 8).

Кинетическая кривая скорости ГВ в вакууме в первом приближении не зависит от давления остаточных газов и с удовлетворительной для инженерных расчетов точностью выражается формулами:

на начальном участке вакуумирования в интервале $0 < t < t_0$

$$\varphi = \varphi_{нач} \left[1 - \left(1 - \frac{\varphi_0}{\varphi_{нач}} \right) \frac{t}{t_0} \right]; \quad (36a)$$

на переходном участке в интервале $t_0 < t < t_{ст}$

$$\varphi = \varphi_0 t^{-\alpha}; \quad (36b)$$

на квазистационарном участке в интервале $t > t_{ст}$

$$\varphi \approx \varphi_{ст}, \quad (36b)$$

где $\varphi_{нач}$, φ_0 , $\varphi_{ст}$, t_0 , $t_{ст}$ и α - экспериментальные константы, характеризующие данный материал.

Для большинства высоковакуумных установок и аппаратов при комнатной температуре можно принять $t_0 \approx 10$ ч, $t_{ст} \approx 150$ ч. Усредненные значения φ_0 и α для некоторых материалов приведены в табл. 8. Поскольку на величины φ_0 , α и парциальный состав продуктов ГВ сильное влияние оказывают обычно неконтролируемые состояния поверхности и структура материалов, то табличные данные следует рассматривать только как ориентировочные.

Диффузия атмосферных газов через металлические и керамические оболочки в вакуум при комнатной температуре пренебрежимо мала. Однако полимерные пленки, резина, некоторые марки стекол и металлические материалы при высоких темпера-

Усредненные величины газосодержания некоторых металлов

Материал		Газосодержание, л·мм рт.ст./г	Основные содержащиеся газы, %		
			водород	азот	кислород
наименование	марка				
	Титан	36,5 2,5 9,6x10 ⁻²	98,5 48 —	1,5 14,4 37,5	— 37,6 62,5
		ПТК ВТ1-1 Иодидный			
Медь МБ	Неотожженный Отожженный в вакууме при 800°С Отожженный в аргоне при 800°С	7,2x10 ⁻³ 3,4x10 ⁻³ 3,0x10 ⁻³	84 78 75	— — —	16 22 25
Никель НВК	Неотожженный Отожженный в вакууме при 900°С Отожженный в аргоне при 900°С	3,3x10 ⁻² 4,6x10 ⁻³ 5,3x10 ⁻³	82,8 50 43	6,7 — —	11,5 50 57
Молибден МЧ	Неотожженный Отожженный в аргоне при 1000°С	1,6x10 ⁻² 1,1x10 ⁻²	47,6 42,9	11,9 —	40,5 57,1

Усредненные десорбционные характеристики конструкционных материалов вакуумной техники

1	2	3	4	5	6
Материал	Способ обработки поверхности		Температура, °С	$q_0, 10^{-8} \frac{\text{л} \cdot \text{мм рт.ст.}}{\text{с} \cdot \text{см}^2}$	α
	2	3	4	5	6
Металлы и сплавы	Алюминий	Необработанная	20	0,5—1,0	1,0—1,2
		Промывка в бензоле и ацетоне	20	0,1	1,0—1,2
		Необработанная	20	0,06	1,0
	Дюралюминий	Необработанная	20	3,0—5,0	0,8—1,1
		Зашкуривание, промывка в бензине	20	0,5	0,8—1,1
	Золото Латунь	Травление, промывка в бензоле и ацетоне	20	0,2—0,5	0,8—1,1
		Необработанная	20	0,02	1,0
		Необработанная	20	10,0	0,8
	Медь	Травление, промывать в бензоле и ацетоне	20	0,1	0,8
		Необработанная	20	3,0—5,0	0,5
Травление, промывка в бензоле и ацетоне		20	0,06—0,1	1,0	
Сталь малоуглеродистая	Зашкуривание, промывка в спирте	20	0,3—0,5	0,5—0,8	
	То же	300	2,0—3,0	1,1—1,3	
	Токарная с последующей промывкой в бензине	20	0,1—1,0	1,1—1,3	
Сталь нержавеющая	Необработанная	20	0,3—0,8	0,7	
	Токарная с последующей промывкой в бензине и спирте	20	0,05—0,1	0,5—0,7	
		Кварцевание	20	0,5—0,7	0,6

1	2	3	4	5	6		
Металлы и сплавы	Титан	Необработанная Травление с последующей промывкой То же	20	0,1-0,3	0,7		
			20	0,05-0,1	0,7		
			400	20	0,2-0,3		
			20	0,02-0,1	0,7		
			Электровакuumное стекло	Промывка в бензине и спирте	20	0,05-0,1	-
					20	0,2-0,5	0,4
					20	0,5-1,0	-
					20	0,8-1,0	0,6
					800	3,0-10,0	0,8 ± ₆
			Стекло и керамика	Кварц Ситаллы Высоковольтный фарфор Стеатит	Промывка в бензине и спирте То же	20	0,8-3,0
800	2,0-10,0	0,9-1,6					
20	0,3-3,0	0,5-1,2					
Эластомер	Вакуумная резина: 7889 ИРП-1433 ИРП-2043 ИРП-2052 Каучук СКУ-7	Необработанная " " " " " " " " " " " " " " " " " "	20	0,3-3,0	0,5-1,2		
			20	0,1-5,0	0,6-1,3		
			20	0,4-10,0	0,5-1,3		
			20	(0,20-3) · 10 ²	0,1-0,3		
			65	(0,5-2) · 10 ³	0,2		
			20	(2,0-4,0) · 10	0,7		
			20	3,0-10,0	0,5		
			200	(0,8-3,5) · 10 ²	0,5-0,7		
			20	5,0-8,0	-		
			20	(2,0-8,0) · 10	0,5		
Пластмасса, стеклоткань, композиция, прочие материалы и изделия	Капролон Поливинилцеллюлозная экструзионная пленка Оргстекло	Необработанная " " " " " " " "	40	(4,0-9,0) · 10	0,4		
			20	(1,2-7,4) · 10	0,8		
			60	(0,4-2) · 10 ²	0,6		
			20	0,03-0,1	1,3		
			20	2,0-10,0	0,3		
80	(0,4-2,0) · 10 ²	0,2					

Пласт-
масса,
стекло-
пласт,
эпок-
сидная
компо-
зиция,
прочие
матери-
алы и
изделия

Поликарбонат	Необработанная "	20	6,6-26,0	0,6
Полистирол	Необработанная	60	(1,5-3,7) · 10	1,4
Полиэтилен низкого давления	Необработанная	60	(1,6-3,5) · 10 ²	0,5
Стеклобумага	Необработанная	20	1,0-4,0	0,7
Стеклопласты:				
ВФТ-С	Необработанная "	20 200	0,02-0,2	0,9
СКФ-9Ф	Необработанная	20	3,5-8,0	0,6
ЭФ-32-301	"	200	(2,8-18,0) · 10 ²	0,8
Стеклотекстолит	Необработанная	20	5,0-20,0	1,0
СТЭФ-1	"	200	(0,9-2,0) · 10 ²	0,6
Стекловолоконный анизотропный материал с эпоксидным связующим (СВАМ)	"	20	1,3-8,0	0,9
Текстолит	Необработанная	200	(1,6-4,2) · 10 ²	0,5
Фторопласт-4	Необработанная	20	7,0-20,0	0,5
Эпоксидные композиции:				
замазки	Необработанная	20	4,0-8,0	0,6
клеи	"	70	(1,6-5,0) · 10	0,8
литьевые	Необработанная	20	(4,0-6,0) · 10 ²	0,5
пропиточные	"	200	1,5-3,0	0,5
Графитовые пластины	Необработанная	20	(1,3-2,5) · 10	0,3
Изоляционные лаки	"	20	3,0-6,0	0,5-0,7
Стантанное электропроводящее покрытие на ситалле	"	20	6,0-10,0	0,5-0,7
	"	20	4,0-10,0	0,5-0,7
	"	20	(1,0-5,0) · 10	0,5-0,7
	Необработанная	20	10 ²	-
	Необработанная	20	0,4-1,0	1,0
	"	100	3,0-10,0	0,5
	Необработанная	20	3,0-10,0	0,5

1	2	3	4	5	6
Пластмасса, стеклопласт, эпоксидная композиция, прочие мате- риалы и изделия	Эмали	Необработанная "	20 100	0,2—4,0 (0,5—5,0)·10 ⁻⁴	0,8 1,0
	Кабель РК-75-4-11		20	2·10 ⁻⁴ л·мм рт.ст. с·м	0,4
	То же без наружной оболочки		20	(2—4)·10 ⁻⁵ л·мм рт.ст. с·м	0,6
	Провод с высокотемпе- ратурной изоляцией ПОЖ		20	(2—4)·10 ⁻⁶ л·мм рт.ст. с·м	0,7

турах обладают заметной проницаемостью. Натекание через оболочки рассчитывается обычно по уравнению диффузии с использованием подробно изложенных в литературе констант проницаемости.

Газовый поток из ионных источников пропорционален отбираемому потоку и в зависимости от типа и режима работы источника колеблется от 0,2 до 0,9 полного потока напускаемого в источник газа.

При оценках газовых потоков стимулированного ГВ для металлических материалов могут быть, по оценке сверху, приняты следующие количества Мл, выбиваемых одной падающей на поверхность частицей: электронные пучки - 10^{-2} ; ионные пучки - $10^{-2} - 2,0$ (бомбардировка поверхности при комнатной температуре ионами с энергией ~ 1 кэВ; меньшее значение соответствует поверхности, подвергнутой длительной тренировке); $10^3 - 5 \times 10^4$ (бомбардировка ионами с энергией ~ 1 кэВ слоя конденсата водорода при температуре 3 - 4 К), кванты - 5×10^{-5} .

Распыление металлических поверхностей ионами с энергией 1 - 10 кэВ оценивается величиной от 10^{-2} (для легких ионов) до ~ 1 (для тяжелых ионов).

Натекание из атмосферы через неконтролируемые течи зависит от метода и схемы течеискания. Оно принимается обычно равным 5-10% суммарного значения других компонентов и уточняется на дальнейших этапах проектирования.

По приведенным выше данным рассчитываются номинальное $\alpha_{ном}$ и максимальное α_{max} значения газового потока в ВС, определяющие требуемую производительность средств откачки.

3. ВЫБОР ОТКАЧНЫХ СРЕДСТВ

На данном этапе проектирования по формулам (32) и (33) рассчитывается БО камеры, разрабатывается блок-схема системы откачки и осуществляется выбор средств высоко- и форвакуумной откачки.

Выбор этих средств в настоящее время достаточно широк. Он делается на основе сопоставительного анализа требований технического задания, эксплуатационных и технико-экономических особенностей промышленных ВН (табл. 9-11, рис. 6-7). Кроме приведенных в этих таблицах и на рисунках данных при выборе насосов необходимо учитывать следующее:

при использовании многоступенчатой системы откачки на основе компримирующих насосов следует обеспечить согласование насосов всех ступеней по производительности;

Сравнительные эксплуатационные характеристики высоковакуумных насосов различных типов

Виды и типы насосов	Характеристики	Наличие в составе токсичных, взрывоопасных, коррозионно-активных веществ	Влияние на окружающую среду	Требуемый агент	Устойчивость к аварийному попаданию атмосферных газов	Селективность	Использование систем с автоматизированным управлением	Эффект саморегулирования отклонений	Принципиальные ограничения по надежности работы		Эффект "плазменности"	Особые характеристики	Необходимость строгой ориентации в пространстве	Устойчивость к ударам, вибрации и тряске	Рекомендуемые области применения
									требуемые	допускаемые					
Диффузионные Парорутные	Есть	Загрязнение парами ртутных жидкостей	Вода Жидкий азот	Полная	Нет или ограниченная (в зависимости от типа рабочей жидкости)	АБ	Возможно	Нет	Нет	Нет	Нет	Токсичность ртутной жидкости	Есть	Ограниченная	Технологическое оборудование с использованием ртути и ее паров; оттока радиоктивных газов
Турбомолекулярные	Есть Нет*	Загрязнение парами смазки в подшипниковых узлах	Вода*	Полная	Полная	АВ	Возможно затруднительно	Нет	Нет	Нет	Нет	—	Есть	Ограниченная	Сверхвысоковакuumное технологическое оборудование; исследование телескопических установок и аппараты; отсечка установок перед включением насосов поверхностного действия

Компримпрюише

Магнитные Зак - трозра- рядные	Нет	Очень слабое загрязнение металлическими парами	Вода* Жидкий азот	Полная	АГ	Возможно	Есть	Есть	Нет	Дальний	Наличие магнитных полей и электромагнитного поля	Нет* Есть	Ограниченная или полная	Сверхмощные технологические оборудование и исследования с редкимпуском атмосферного воздуха и малыми газовыми нагрузками
Ионно-геттерные Испарительные	Нет	Загрязнение парами геттера; синтез метана*	Вода* Жидкий азот*	Нет или ограниченная*	АГД	Возможно	Есть	Нет	Заметный	-	Нет* Есть	Нет* Есть	Ограниченная или полная	Технологическое оборудование и исследования с повышенными газовыми нагрузками и требованиями "безмыслиного" вакуума
Криодсорбиционные	Нет	Загрязнение мелкодисперсными частицами жидким сор.* бенз	Жидкий азот Газообразный и жидкий гелий	Ограниченная	АГДЕ	Возможно затруднительно*	Есть только по ресурсу	Есть Нет*	Есть (перемерзания)	Заметный	Чувствительность к температурным нагрузкам	Нет* Есть	Ограниченная или полная	Технологическое оборудование и исследования с высокими требованиями к чистоте остаточной среды
Конденсационные	Нет	Нет	Жидкий азот Газообразный и жидкий гелий	Ограниченная	АД	Возможно	Есть только по ресурсу	Нет	Есть (нагрев для удаления слоев конденсата)	Слабый	Чувствительность к температурным нагрузкам	Нет* Есть	Полная	Технологическое оборудование и исследования с очень высокими газовыми нагрузками и требованиями "безмыслиного" вакуума

* В некоторых конструктивных модификациях насосов.

кв А - быстрая действия зависит от М; Б - коэффициент компрессии слабо зависит от М;

В - коэффициент компрессии сильно зависит от М; Г - быстрая действия зависит от рода откачиваемого газа; Д - предельное остаточное давление зависит от рода откачиваемого газа; Е - сорбционная емкость (ресурс) зависит от рода откачиваемого газа.

Основные количественные

Виды и типы насосов	Основные характеристики	Страна, фирма, марка	Быстрота действия,		
			N ₂ , л/с	He, л/с	Воздух, л/с
Компримирующие	Диффузионные парортутные	СССР Edwards Leybold	18-90 25-14000 9-72	16-80 - 8-64	10-50 10-11000 5-40
	Диффузионные Паромасляные	СССР СССР Alcatel Balzersdi F Leybold DI Leybojet Leyboldi FF Varian NRCM Varian VHS Varian NRCMS	180-10800 900-11880 450-27000 320-35100 720-90000 310-54000 54-1080 315-2700 2100-6300 18000-171000	160-9600 800-10560 400-24000 290-31200 640-80000 270-48000 48-9600 210-1800 1500-3800 12300-140000	100-6000 500-6600 250-15000 180-19500 400-50000 170-30000 30-6000 175-1500 1200-3500 10 ⁴ -9,5·10 ⁴
		Турбомолекулярные	СССР Balzers TRU TRH Balzers TVP Leybold Turbovak	- 200-380 1250-7000 150-2900	- 200-500 1250-700 200-3400
Поверхностного действия	Магнитные Электрорезрядные	НОРД НМД	27-1620 16-2700	1-60 1-200	10-600 6-1000
		Leybold диодные	4-16	0,5-2,0	2-8
		IZ триодные	60-1000	8,4-200	30-500
		RIBER IP Varian диодные	90-4300 16-2000	5-240 2,4-300	50-2400 8-1000
		Vacion триодные Veeco-Mag-Ion	40-1600 40-1800	6-240 3,7-165	20-800 20-900
Ионно-геттерные Испарительные	ГИН	1400-18000	7-70 (по Ar)	450-4500	
	НИБ	2000-11000	-	1000-60000 (по N ₂)	
	Leybold V-2500+ Turbovak-450	4000	-	2500 (по N ₂)	
	Leybold V-400 + IZ 230 TSP+Vac Ion	- 530	- -	620 800	
	Varian И-Ball ГСВ	1100-11000 -	- -	1700-17000 (по N ₂) 100-6000	
Криогенные	Balzers KRY	3000-10000	-	1000-5000	

4/53

характеристики промышленных высоковакуумных насосов некоторых типов

Производительность, л/мм рт. ст./с	Производительность (Вт) на 1 Вт потребляемой мощности	Предельное остаточное давление, мм рт. ст.	Максимальное рабочее давление, мм рт. ст.	Давление запуска, мм рт. ст.
0,2-0,9 2,1-6 0,12-0,5	$(2-5) \cdot 10^{-7}$ $8 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-4}$ $4 \cdot 10^{-5} - 1,9 \cdot 10^{-4}$	$(2-5) \cdot 10^{-7}$ $10^{-7} - 5 \cdot 10^{-8}$ 10^{-6}	$1 \cdot 10^{-2}$ $0,5 - 5 \cdot 10^{-2}$ $15 - 6 \cdot 10^{-1}$	1 4-0,35 15-0,6
0,2-2,8 0,5-4,8 0,3-6 0,3-20 1-30 0,8-24 0,06-3 0,8-2,4 2-3,5 5-30	$1,1 \cdot 10^{-5} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ $7,4 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-4} - 9,5 \cdot 10^{-5}$ $8 \cdot 10^{-5} - 9,5 \cdot 10^{-5}$ $3,3 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ $4,8 \cdot 10^{-5} - 1,3 \cdot 10^{-4}$ $2,4 \cdot 10^{-4} - 2,1 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-4} - 2,1 \cdot 10^{-4}$ $8,3 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-7}$ 10^{-8} $3 \cdot 10^{-7}$ $10^{-6} - 10^{-8}$ $10^{-6} - 10^{-8}$ 10^{-6} $5 \cdot 10^{-8}$ $5 \cdot 10^{-8}$ 10^{-10}	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$ 10^{-3} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-2} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-4} 10^{-3}	0,4-0,1 0,25-0,3 0,3-0,4 0,4-0,3 0,4 0,8-0,3 0,2 0,4-0,6 0,55 0,55-0,40
$5 \cdot 10^{-2}$ 1,6-3,3 10-20	$2,2 \cdot 10^{-5}$ $1,1 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ $8,9 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-9} $5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-7}$ $5 \cdot 10^{-11}$	10^{-3} 10^{-2} 10^{-2}	- 1,6-3,2 10-20
0,78-37,5	$8,6 \cdot 10^{-5} - 4,2 \cdot 10^{-3}$	10^{-10}	10^{-2}	$10^{-1} - 10^{-2}$
$2,5 \cdot 10^{-3}$ $-4,2 \cdot 10^{-1}$ $1,1 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ $4 \cdot 10^{-4}$ $-1,0 \cdot 10^{-3}$ $1,5 \cdot 10^{-3}$ $-1,8 \cdot 10^{-2}$ $6 \cdot 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-3}$ $-5 \cdot 10^{-2}$ $2 \cdot 10^{-3}$ $-3 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-3}$ $-5,4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-7} - 8,9 \cdot 10^{-7}$ $3,7 \cdot 10^{-7} - 3,8 \cdot 10^{-6}$ $8,8 \cdot 10^{-8} - 1,7 \cdot 10^{-7}$ $1,6 \cdot 10^{-8} - 3,2 \cdot 10^{-7}$ $4,8 \cdot 10^{-7}$ $6 \cdot 10^{-7} - 7,3 \cdot 10^{-7}$ $2,6 \cdot 10^{-7}$ $5,7 \cdot 10^{-7}$ $1,9 \cdot 10^{-7} - 1,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$ $5 \cdot 10^{-10}$ 10^{-11} $4,5 \cdot 10^{-11}$ 10^{-11} 10^{-11} 10^{-11} 10^{-11}	$8 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-3}$ $0,7 \cdot 10^{-3}$ $0,7 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-3}$ 10^{-3} 10^{-3} 10^{-4}	$5 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-2}$
$1,8 \cdot 10^{-3}$ $-1,5 \cdot 10^{-2}$ $10^{-3} - 6 \cdot 10^{-2}$ $3,6 \cdot 10^{-2}$ $6 \cdot 10^{-2}$ $2 \cdot 10^{-3}$ $4 \cdot 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-2}$ -	$2,8 \cdot 10^{-7} - 5,7 \cdot 10^{-7}$ $2,2 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$ $1,6 \cdot 10^{-6}$ $1,8 \cdot 10^{-6}$ $2 \cdot 10^{-7}$ $1,2 \cdot 10^{-6} - 5,3 \cdot 10^{-6}$ -	$1 \cdot 10^{-9}$ $5 \cdot 10^{-9}$ 10^{-10} 10^{-9} 10^{-11} 10^{-11} 10^{-10}	$10^{-6} - 10^{-5}$ 10^{-5} 10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} $2 \cdot 10^{-2}$ -	10^{-3} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-2} 10^{-2} $5 \cdot 10^{-2}$ -
-	-	-	10^{-3}	0,1

Таблица 10

Виды и типы насосов	Основные характеристики	Коэффициент X_0	Удельная масса		
			кг л/с	кг л·мм рт.ст./с	
Компримирующие	Диффузионные парорутные	0,08—0,15	$6 \cdot 10^{-1}$ — $1,7 \cdot 10^{-1}$	30—9,6	
		0,03—0,16	$3,6 \cdot 10^{-1}$ — $2,1 \cdot 10^{-2}$	1,7—38,3	
		0,07—0,08	$1,6 \cdot 10^{-1}$ — $2,8 \cdot 10^{-2}$	6,7—2,2	
	Диффузионные Паромасляные	0,15—0,26	10^{-1} — $2,5 \cdot 10^{-2}$	50—53	
		0,21—0,29	$3,2 \cdot 10^{-2}$ — $7,6 \cdot 10^{-2}$	32—25	
		0,43—0,46	$1,6 \cdot 10^{-2}$ — $1,0 \cdot 10^{-2}$	13,3—25	
		0,50—0,55	$2,2 \cdot 10^{-2}$ — $1,5 \cdot 10^{-2}$	13,3—15	
		0,44—0,55	$1,8 \cdot 10^{-2}$ — $1,3 \cdot 10^{-2}$	7,0—21	
		0,44—0,51	$4,1 \cdot 10^{-2}$ — $1,7 \cdot 10^{-2}$	8,8—20,8	
		0,21—0,54	$6,7 \cdot 10^{-2}$ — $1,0 \cdot 10^{-2}$	33,3—20,0	
		0,26—0,43	$8,6 \cdot 10^{-2}$ — $2,10^{-2}$	5,6—12,2	
		0,62—0,52	$2,1 \cdot 10^{-2}$ — $6,6 \cdot 10^{-3}$	12,4—6,6	
		0,53—0,60	$2,3 \cdot 10^{-2}$ — $1,7 \cdot 10^{-2}$	45—54	
Турбомолекулярные	0,09	0,85	$2,2 \cdot 10^3$		
	0,22—0,19	$1,1 \cdot 10^{-1}$ — $7,6 \cdot 10^{-2}$	13,8—10,3		
	0,19—0,29	$2,8 \cdot 10^{-1}$ — $1,6 \cdot 10^{-1}$	31—52,5		
	0,08—0,11	$8,2 \cdot 10^{-2}$ — $7,3 \cdot 10^{-1}$	23—4,3		
Поверхностного действия	Магнитные Электроразрядные	0,013—0,084	0,75—0,52	$3 \cdot 10^3$ — $2,6 \cdot 10^3$	
		0,11—0,18	0,48—0,29	$2,6 \cdot 10^3$ — $2,9 \cdot 10^3$	
		0,09—0,07	0,25—1,3	$1,3 \cdot 10^3$ — 10^4	
		0,09—0,24	0,45—0,27	$9 \cdot 10^3$ — $7,5 \cdot 10^3$	
		0,02—0,13	0,76—0,29	$9,3 \cdot 10^3$	
		0,02—0,15	0,34—0,42	$9 \cdot 10^2$ — $8,4 \cdot 10^3$	
		0,15—0,12	0,48—0,53	$4,8 \cdot 10^3$ — $1,4 \cdot 10^4$	
		0,15—0,43	0,46—0,25	$9,1 \cdot 10^3$ — $4,2 \cdot 10^3$	
		Ионно-геттерные Испарительные	0,19—0,2	0,08—0,05	$2 \cdot 10^4$ — $1,4 \cdot 10^4$
			0,43—0,46	0,02—0,01	$2 \cdot 10^4$ — $1,1 \cdot 10^4$
	0,44		$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^3$	
	0,39		—	—	
	0,38		$2,5 \cdot 10^{-2}$	10^4	
0,63	—		—		
Криогенные	0,11—0,17	—	—		

$$\frac{Q_{max}}{Q_{ном}} \approx 1$$

при проектировании ВС, характеризующихся условием $\frac{Q_{max}}{Q_{ном}} \approx 1$, выбор ВН следует производить для каждого из газокинетических режимов и далее по рабочей диаграмме выбранных насосов проверить устойчивость системы в каждом из этих режимов;

для обеспечения высокой надежности проектируемой системы целесообразно обеспечивать коэффициент использования $\eta_v < 1$; поскольку удельные значения стоимости и энергопотребления насосов различных типов (как видно из рис. 6 и 7) раз-

Рис. 6. Усредненные величины энергопотребления вакуумных насосов различных типов вблизи точки Q_{max} на рабочей диаграмме в зависимости от номинальной скорости действия: 1, 2 — диффузионные насосы; 3, 4 — турбомолекулярные насосы; 5, 6 — магнитные электроразрядные насосы; 7 — ионно-геттерные насосы; 8 — автономный гелиевый конденсационный насос ГК-40; 9 — автономные водородные конденсационные насосы ВК-40 и ВК-100; 10 — технические возможные для данных конструкций ожигателей водородные конденсационные насосы типа ВК-40; 11, 12 — двухроторные насосы; 13 — эжекторные насосы; 14, 15, 16 — механические форвакуумные насосы

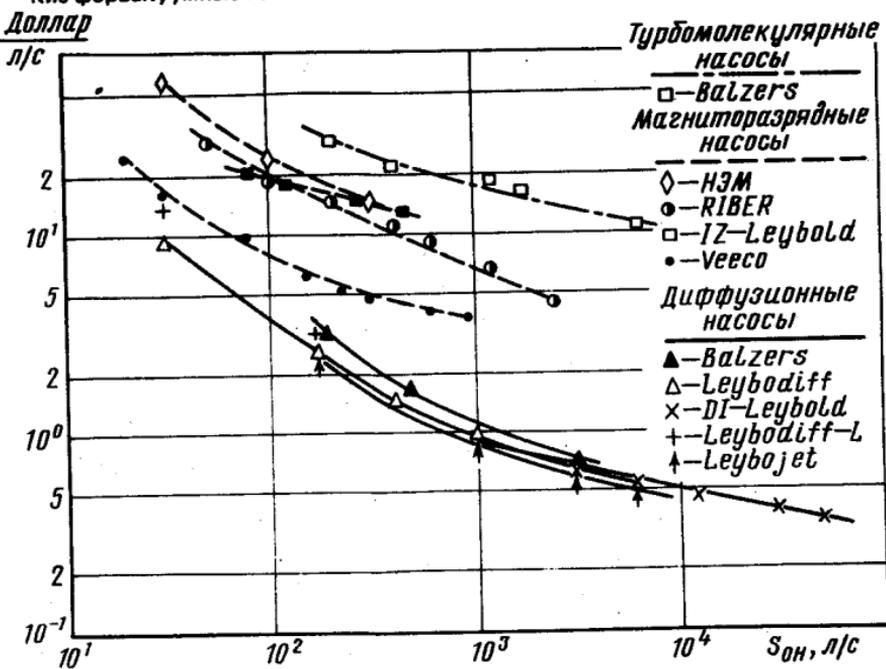
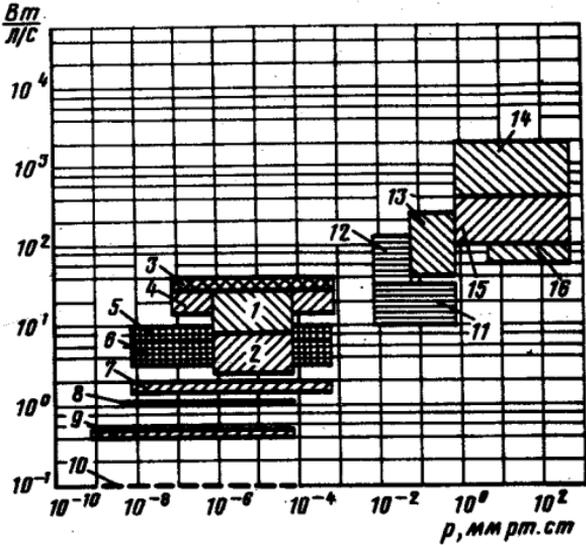


Рис. 7. Усредненные величины удельной стоимости высоковакуумных насосов различных типов в зависимости от номинальной скорости действия

Основные характеристики промышленных

Характеристика		Страна, фирма, марка	Быстрота действия по воздуху, л/с	Производительность, л·мм рт.ст./с	Предельное остаточное давление, мм рт. ст.		
Виды и типы насосов							
водокольцевые		СССР	25 – 5000	$1,3 \times 10^4 - 3,4 \times 10^6$	532 – 684		
Маслянистые	Пластинчато-роторные	одно-ступенчатые	Alcatel	4,2 – 16,7	$3,2 \times 10^3 - 1,3 \times 10^4$	8×10^{-3}	
			Balzars	1,1 – 43	$8,4 \times 10^2 - 3,3 \times 10^4$	$1 - 5 \times 10^{-1}$	
			Leibold	0,7 – 17	$5,3 \times 10^2 - 1,3 \times 10^4$	$8 \times 10^{-1} - 3 \times 10^{-1}$	
		двухступенчатые	СССР	0,25 – 6	$1,9 \times 10^2 - 4,6 \times 10^3$	5×10^{-3}	
			Alcatel	1,25 – 33	$9,5 \times 10^2 - 2,5 \times 10^4$	1×10^{-4}	
			Alcatel	1,25 – 8,9	$9,5 \times 10^2 - 6,8 \times 10^3$	1×10^{-4}	
			Balzars	1,1 – 47	$8,4 \times 10^2 - 3,8 \times 10^4$	$1 \times 10^{-2} - 7 \times 10^{-3}$	
			Edwards	0,88 – 18,3	$88 - 1,8 \times 10^2$	$10^{-2} - 3 \times 10^{-1}$	
			Leibold	0,7 – 17	$5,3 \times 10^2 - 1,3 \times 10^4$	10^{-2}	
		пластинчато-статорные	одноступенчатые	Leibold	1,7 – 69	$1,3 \times 10^3 - 5,2 \times 10^4$	$5 \times 10^{-1} - 2 \times 10^{-1}$
				СССР	0,78 – 2,6	$5,9 \times 10^2 - 2 \times 10^3$	3×10^{-2}
			двухступенчатые	Leibold	6,9 – 55,5	$5,2 \times 10^3 - 4,2 \times 10^4$	2×10^{-3}
	СССР			9 – 500	$6,8 \times 10^3 - 3,8 \times 10^5$	$8 \times 10^{-1} - 1$	
	плунжерные		одноступенчатые	Leibold	23,8 – 80,6	$1,8 \times 10^4 - 6,1 \times 10^4$	$2,3 \times 10^{-1}$
			двухступенчатые	СССР	6 – 100	$4,6 \times 10^3 - 7,6 \times 10^4$	$3 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-2}$
	С масляным уплотнением	двухроторные	СССР	7 – 1500	$7 - 1,5 \times 10^3$	$4 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-3}$	
			Alcatel	94 – 2222	$3,3 \times 10^3 - 1,6 \times 10^4$	10^{-3}	
			Balzars	75 – 2222	$5,7 \times 10^4 - 1,7 \times 10^6$	10^{-3}	
Edwards			80 – 2500	$6,1 \times 10^4 - 1,9 \times 10^6$	2×10^{-2}		
Heranes			56 – 1944	$5,6 \times 10^2 - 1,9 \times 10^4$	10^{-3}		
Leibold			19 – 514	$1,9 \times 10^2 - 5,1 \times 10^3$	10^{-3}		
трохоидальные		Leibold	130 – 170	$9,8 \times 10^4 - 1,3 \times 10^5$	5×10^{-2}		
		Струйные	водоструйные	СССР	0,03	0,5	15
				Edwards	0,065	0,85	12 – 14
				Leibold	0,111	1,7	15
парожетторные	СССР	–	–	1 – 20 кг/л	1 – 20		
		Сорбционные	цеолитовые**	СССР	–	21*	10^{-2}
Edwards	0,016*			48	10^{-3}		
General Electric	0,007			85	10^{-3}		
Leibold	0,14			15	10^{-2}		
RIBER	0,75			143	10^{-4}		
VARIAN	0,4			140	–		

* Производительность цеолитовых насосов рассчитывалась по формуле $Q^* = \frac{760V}{L}$, где L – время откачки камеры объемом V от атмосферного давления до 10^{-1} мм рт.ст.;

Формвакуумных насосов.

Удельная масса		Влияние, оказываемое на отключаемый объект	Требуемый хлад-агент	Необходимость строгой ориентации в пространстве	Принципиальные ограничения продолжительности работы
кг л/с	кг л·мм рт.ст./с				
7,6 - 684	$1,4 \times 10^{-2} - 1,4 \times 10^{-3}$	Попадание паров воды			
5,4 - 4,8	$7 \times 10^{-3} - 6,2 \times 10^{-3}$	Сильное загрязнение парами масел	Вода ^{кк}	Есть	Нет
21,8 - 11,6	$2,9 \times 10^{-2} - 1,5 \times 10^{-2}$				
16 - 4,5	$2,1 \times 10^{-2} - 5,9 \times 10^{-3}$				
66 - 12,5	$8,7 \times 10^{-2} - 1,8 \times 10^{-2}$				
16 - 7,8	$2,1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-2}$				
16 - 5,6	$2,1 \times 10^{-2} - 7,4 \times 10^{-3}$				
23,6 - 10,4	$3,1 \times 10^{-2} - 1,4 \times 10^{-2}$				
33 - 8,3	$3,3 \times 10^{-1} - 8,3 \times 10^{-1}$				
21,4 - 5,3	$2,8 \times 10^{-2} - 6,9 \times 10^{-3}$				
27,1 - 5,4	$3,5 \times 10^{-2} - 7,2 \times 10^{-3}$				
83 - 42	$1,1 \times 10^{-1} - 5,5 \times 10^{-2}$				
18,1 - 6,8	$2,4 \times 10^{-2} - 8,9 \times 10^{-3}$				
12,2 - 8,4	$1,6 \times 10^{-2} - 1,1 \times 10^{-2}$				
7,2 - 4,7	$9,5 \times 10^{-3} - 6,2 \times 10^{-3}$				
60 - 9,5	$2,6 \times 10^{-2} - 1,2 \times 10^{-2}$				
3,3 - 0,6	3,3 - 0,6				
1 - 0,47	$2,9 \times 10^{-2} - 6,5 \times 10^{-2}$				
1,1 - 0,68	$1,4 \times 10^{-3} - 8,9 \times 10^{-4}$				
1,1 - 0,66	$1,4 \times 10^{-3} - 8,6 \times 10^{-4}$				
2,5 - 0,87	$2,5 \times 10^{-1} - 8,7 \times 10^{-2}$				
3,9 - 0,78	$3,9 \times 10^{-1} - 7,8 \times 10^{-2}$				
5,4 - 4,3	$7,2 \times 10^{-3} - 6,3 \times 10^{-3}$				
-	-				
1,5	0,1				
1,4	0,1				
	$318 = \frac{38}{0,5} \frac{\text{кг}}{\text{кг/ч}}$	Попадание паров воды	Вода	Нет	
186	$6,3 \times 10^{-2}$	Загрязнение мелкодисперсными частицами сорбента	Жидкий азот		Есть (регенерация)
173 ^{ккк}	$1,4 \times 10^{-2 \text{ккк}}$				
24,4	$2,3 \times 10^{-1}$				
1,6 ^{ккк}	$8,4 \times 10^{0 \text{ккк}}$				
13,2	$3,8 \times 10^{-2}$				

$$S^* = \frac{P_1 - P_2}{t_2 - t_1} V_1 \frac{1}{P_1 + P_2}; \quad \text{кк} - \text{ для части насосов этого типа; ккк} - \text{ масса цеолита.}$$

личным образом зависят от S_{OH} , то в общем случае невозможен выбор системы откачки, удовлетворяющей одновременно требованиям минимальной стоимости и минимальных эксплуатационных расходов; оптимизация системы откачки в этом смысле может производиться по одному из этих критериев либо по совокупной стоимости откачки единицы массы газа при фиксированном сроке окупаемости проектируемого оборудования.

Параметры выбранных ВН должны быть уточнены на последующих этапах проектирования, после определения пропускной способности ЭВС, устанавливаемых между насосом и вакуумной камерой.

4. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

Пропускная способность длинных T_p ($l \gg a$) постоянного или монотонно меняющегося сечения определяется, как уже отмечалось, по вытекающим из уравнений Пуазейля (для вязкостного режима) и Кнудсена (для молекулярного режима) формулам, которые приведены в табл. 2.

Сопротивление, оказываемое газовому потоку другими ЭВС, в частности, короткими T_p , принимается обычно равным сумме двух компонентов - сопротивления входного отверстия $1/G_0$ и сопротивления остального канала $1/G_{Tp}$, рассматриваемого в этом случае как длинный T_p , т. е.

$$\frac{1}{G_{KTP}} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_{Tp}}. \quad (37)$$

Такой подход не является вполне строгим; возникающая при его использовании погрешность не превышает 25%.

В вязкостном режиме для воздуха при $T = 293$ К и $0,05 \leq \frac{P_2}{P_1} \leq 0,5$ $G_{0\text{вязк}} = 7,68 \cdot 10^{-2} F_0 [0,945 \frac{P_2}{P_1} + 0,053]$ л/с, (38) где P_1, P_2 - соответственно большее и меньшее давления по обе стороны отверстия;

F_0 - площадь входного отверстия трубопровода, см². Отношение $\frac{P_2}{P_1}$ на начальном этапе проектирования не известно, поэтому расчеты по формуле (38) ведутся методом последовательных приближений.

В молекулярном режиме ПС отверстия не зависит от давления и по своей величине на единицу площади совпадает с V_0 (12), т. е.

$$G_{0\text{мол}} = V_0 F_0 = 3,64 F_0 \left(\frac{T}{M} \right)^{0,5}. \quad (39)$$

Далеко не все ЭВС могут быть представлены в виде совокупности коротких Tp , поддающихся аналитическому расчету. Для определения ПС таких ЭВС в молекулярном режиме удобным оказывается введение некоторого безразмерного коэффициента проводимости P , зависящего только от геометрической формы рассматриваемого ЭВС (табл. 12). При использовании этого коэффициента пропускная способность ЭВС $G_{ЭВС}$ выражается через проводимость его входного отверстия и имеет вид

$$G_{ЭВС} = P G_{омол} = 3,64 P F_0 \left(\frac{T}{M} \right)^{0,5} \quad (40)$$

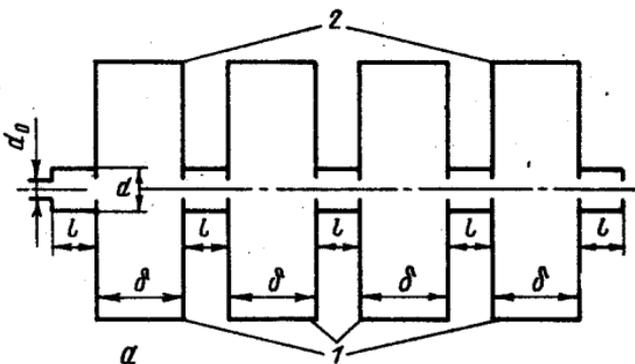
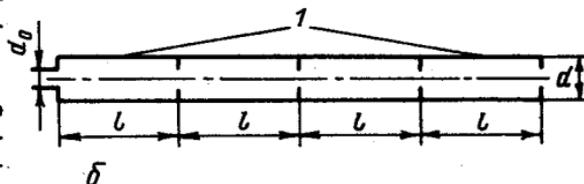


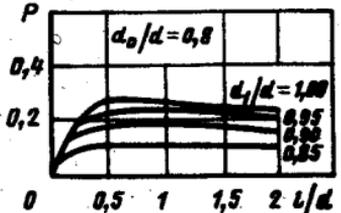
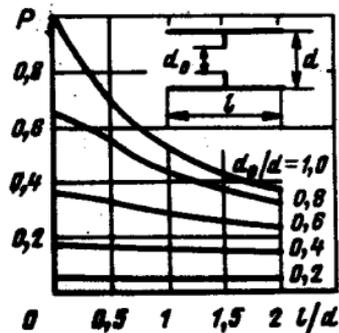
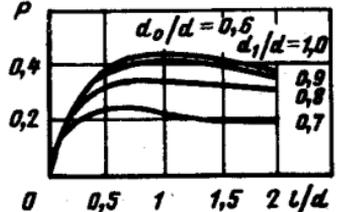
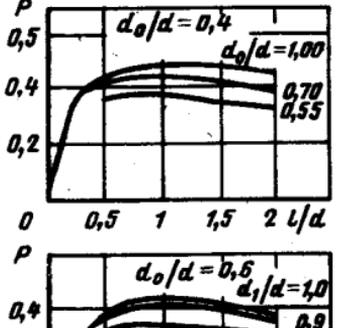
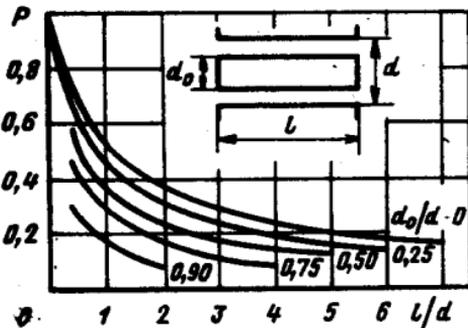
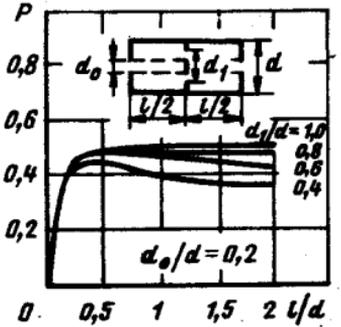
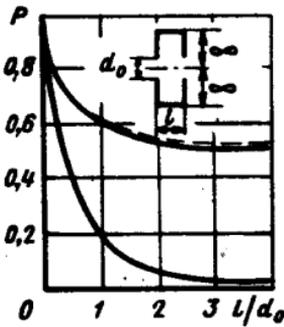
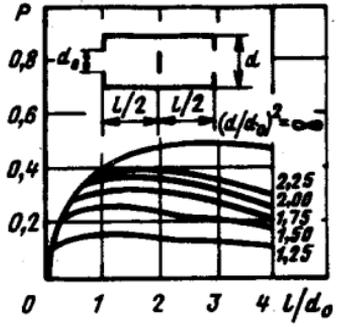
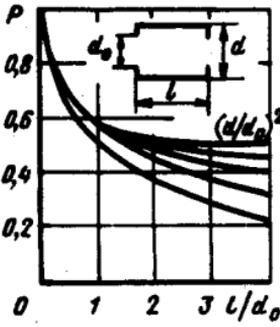
Рис.8. Расчетная схема структурно-периодической камеры типа "диафрагмированный волновод": а — начальное состояние структуры ($\delta \neq 0$); б — конечное состояние структуры ($\delta = 0$); 1 — элементарные ячейки; 2 — разделительные сосуды



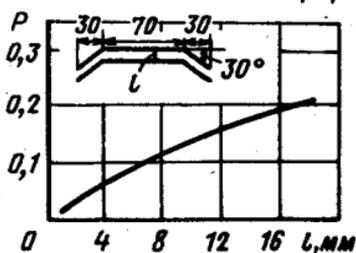
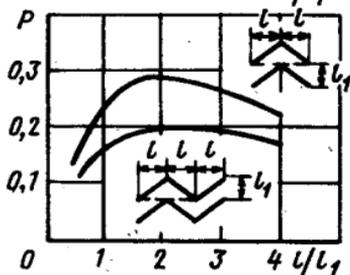
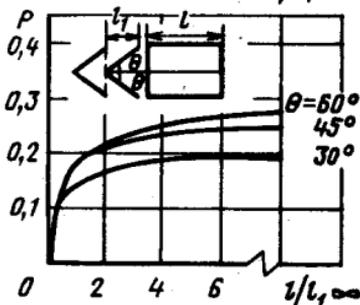
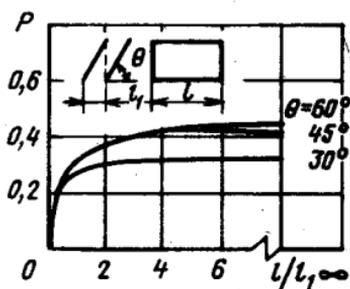
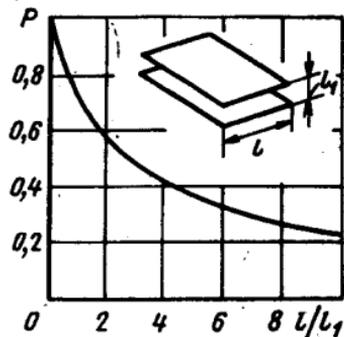
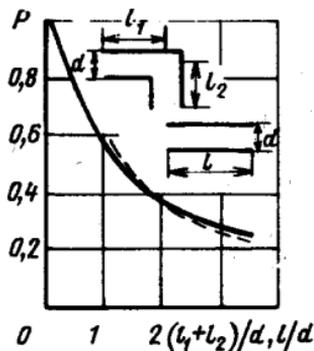
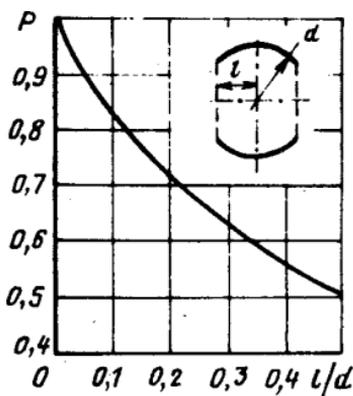
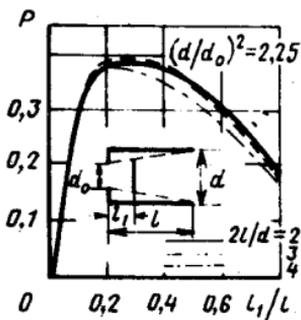
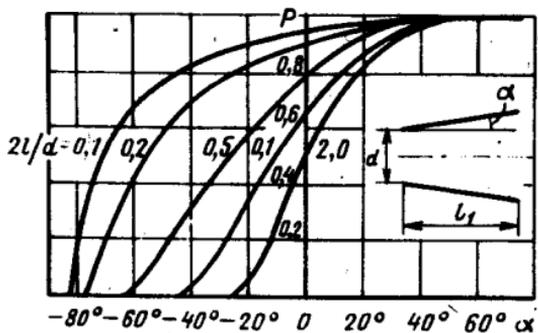
Коэффициенты P для наиболее распространенных структур приведены в табл. 12. Применение формулы (40) допустимо в условиях равновесного состояния газа по обе стороны рассматриваемого ЭВС. Практически это означает, что он должен соединять ВК достаточно большого объема, имеющие одинаковую температуру.

Аналогичный подход может быть использован и при приближенных инженерных расчетах ПС структурно-периодических камер, представляющих собой набор одинаковых элементарных ячеек. Например, диафрагмированный цилиндрический волновод (рис. 8, б) может рассматриваться как предельное состояние структуры, содержащей последовательный набор одинаковых элементарных ячеек, а именно — трубок диаметром d , ограниченных диафрагмами с центральным отверстием диаметром d_0 и разделенных сосудами большого объема (рис. 8, а), если осевая протяженность этих сосудов δ обращается в нуль. Сопротивление каждой элементарной ячейки (в первом прибли-

Коэффициенты проводимости P элементарных структур



Продолжение табл. 12



жении) складывается из трех компонентов – сопротивлений входной и выходной диафрагм и сопротивления собственно трубки. Поэтому описанная выше трансформация структуры, состоящая в совмещении выходной и входной диафрагм соседних ячеек, должна приводить к исключению сопротивления входной диафрагмы.

Проделав соответствующие преобразования, проводимость элементарной ячейки анализируемого волновода $G_{яч}$ можно представить в виде

$$G_{яч} = \frac{\rho}{1-\rho} G_0, \quad (41)$$

где коэффициент ρ определяется из табл. 12; $G_0 = 0,91 \alpha d_0^2 \left(\frac{T}{M}\right)^{0,5}$ – проводимость центрального отверстия в диафрагме.

Проводимость всего волновода G_θ , содержащего π элементарных ячеек, составит

$$G_\theta = \frac{1}{\pi} G_{яч} = \frac{\rho G_0}{\pi(1-\rho)}. \quad (42)$$

Поскольку в реальных волноводах π составляет $\sim 10^2$, расчет G_θ другими возможными способами, например, методом Монте-Карло, представил бы определенные вычислительные трудности.

Реальные трубопроводы дискретно меняющегося профиля аналогичным образом могут быть представлены как совокупность ряда элементарных ячеек, характеризуемых каждая некоторым коэффициентом ρ . Поэтому описанный метод приближенного определения ПС сложных ЭВС оказывается весьма эффективным.

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Значительная часть ВС характеризуется распределенным характером одного или нескольких вакуумных параметров – газовой нагрузки, сопротивления, расположения откачных средств и присоединительных Тр. Давление РГ в таких системах меняется существенно нелинейно; вследствие высокой стоимости важное значение приобретает их технико-экономическая оптимизация, состоящая в таком выборе ЭВС, который обеспечивает требуемые вакуумные условия при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

Поскольку для большинства ВСРП характерен квазистационарный молекулярный режим, ограничимся рассмотрением только этого случая.

Примером простейшей ВСРП является протяженная изотермическая ВК, откачиваемая с одной из сторон (рис. 9). Источник газовой нагрузки для насоса в этой системе – распределенный поток десорбции со стенок камеры плотностью q , г·мм рт. ст./ (с·см²). Давление по длине камеры имеет параболическое распределение

$$p_x - p_H = \frac{q \pi (lx - 0,5x^2)}{\alpha a^3} \left(\frac{M}{T} \right)^{0,5}, \quad (43)$$

где p_x – давление в x -м сечении камеры, мм рт. ст.;
 p_H – определяется по формуле (22);
 π – периметр камеры, см;

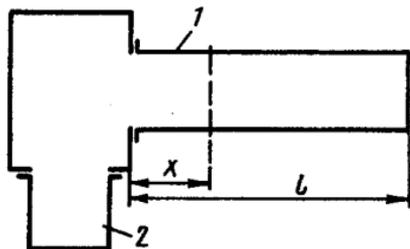


Рис. 9. Расчетная схема простейшей ВСРП:
 1 – вакуумный насос; 2 – протяженная камера

α – безразмерный коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения камеры и равный 3,80 (для круглой камеры с диаметром), 4,85 (для квадратной со стороной s) и 9,7 $\zeta^2 / (1 + \zeta)$ (для прямоугольной со сторонами a и $b = \zeta a$); a – характеристический размер сечения камеры (соответственно d , s и a), см.

Определяемый по формуле (43) перепад давлений между торцами камеры и среднее давление в камере, выраженные в мм рт. ст., удобно представить для различных температур и газов в виде

$$p_L - p_H = q \bar{p}; \quad (44)$$

$$p_{ср} - p_H = 0,67 q \bar{p}, \quad (45)$$

где \bar{p} – некоторый коэффициент (рис. 10), равный перепаду давлений между торцами (мм рт. ст.) при $q = 1$ л·мм рт. ст./с·см².

Другим примером ВСРП является коллекторная откачка камер с малой ПС. Рассматривая анализируемую систему “камера – π соединительных трубопроводов – коллектор”, как замкнутую структуру с однородной распределенной нагрузкой, откачиваемую

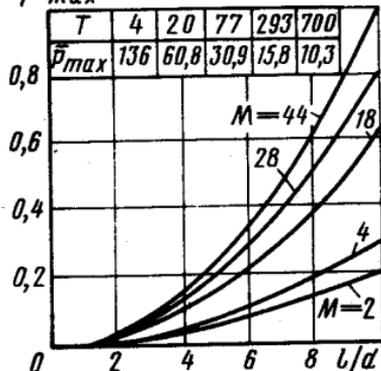
\bar{p}/\bar{p}_{max} 

Рис. 10. Зависимость \bar{p} для камеры круглого сечения от соотношения l/d для различных температур и газов; \bar{p}_{max} соответствует трубопроводу с $l/d = 10$ для CO_2 ($M=44$).

N равномерно расположенными насосами с одинаковыми параметрами $p_{он}$, $S_{он}$ для каждого из ее участков (рис. 11), можно записать

$$p_{max} = p_{он} + \frac{a}{NS_{он}} + \frac{\kappa a / N - \kappa^2 (\varphi \pi l + \varphi_{кол} \pi_{кол} l_{кол})}{2G_{кол}} - \frac{\kappa^2 \varphi_{вп} \pi_{вп} l_{вп}}{2G_{кол}} + \frac{2\varphi \pi l + \varphi_{вп} \pi_{вп} l_{вп}}{2G_{вп}} + \frac{0,375 \varphi \pi l}{G}, \quad (46)$$

где p_{max} - максимальное давление в камере;

$a = \varphi \pi l + \varphi_{кол} \pi_{кол} l + \pi \varphi_{вп} \pi_{вп} l_{вп}$ - суммарная газовая нагрузка; $\pi = (2\kappa + 1)N$; κ - порядковый номер наиболее удаленного от насоса соединительного Тр;

π , G - соответственно периметр и ПС участков камеры (обозначения даны без индекса), коллектора (индекс "кол") длиной l и соединительного Тр (индекс "вп") длиной $l_{вп}$.

С достаточной для инженерных расчетов точностью

$$p_{max} = \frac{\varphi \pi l}{N} \left[\frac{F_1}{S_{он}} + \frac{0,13 L F_2}{\omega a^2 N} \left(\frac{M}{T} \right)^{0,5} \right]; \quad (47)$$

$$F_1 = 1 + \varepsilon(t + r);$$

$$F_2 = \frac{1}{(2\kappa + 1)^2} \left[\frac{4\kappa(\kappa + 1)F_1 + 8r + 4\varepsilon r^2 + 3}{t^3} \right],$$

$$\text{где } \varepsilon = \frac{\varphi_{кол}}{\varphi} = \frac{\varphi_{вп}}{\varphi}; \quad t = \frac{a_{кол}}{a}; \quad r = \frac{l_{вп}}{l}.$$

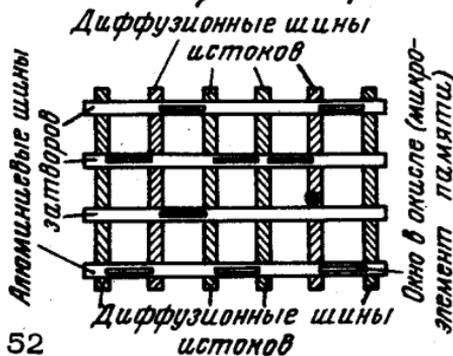


Рис. 11. Расчетная схема и распределение давления на участке вакуумной системы с коллекторной откачкой: 1 - вакуумный насос; 2,3 - участки камеры и коллектора; 4 - соединительные трубопроводы; а, в - распределение давления в камере и коллекторе соответственно; б - перепад давлений на соединительных трубопроводах

Функция F_2 показана на рис. 12.

Поскольку величины $q, \Pi, L, \alpha, a, T, M, p_{p\min}$ заданы или определены на предыдущих этапах проектирования, соотношение (47) можно записать в виде, являющемся исходным уравнением для выбора N и S_{OH} :

$$p_{\max} = \tilde{C}F_1 \frac{1}{NS_{OH}} + \tilde{D}F_2 \frac{1}{N^2} \leq p_{p\min}, \quad (48)$$

где $\tilde{C} = q\Pi L$; $\tilde{D} = \frac{0,13\tilde{C}L}{\alpha a^3} \left(\frac{M}{T}\right)^{0,5}$.

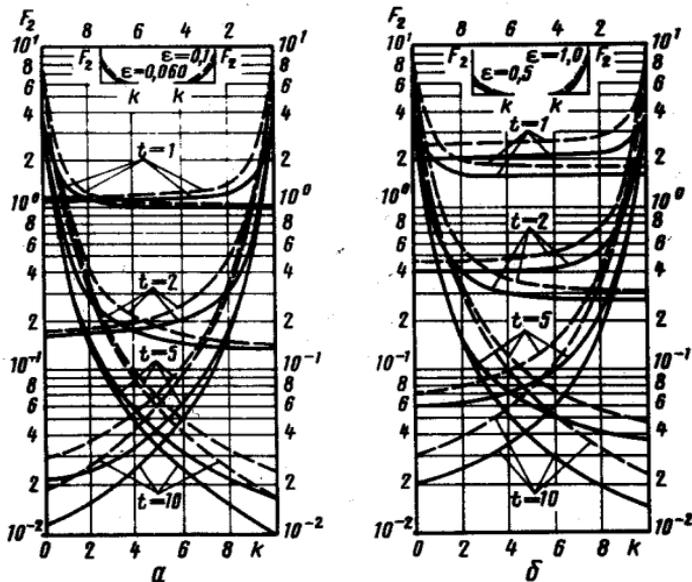


Рис. 12. Функции F_2 в зависимости от k и ϵ
на схеме а $\epsilon = 0,06$ и $0,1$; на схеме б $\epsilon = 0,5$ и $1,0$

Для грубой оценки этих величин можно использовать неравенства

$$N > \frac{0,35L}{\alpha^{1,5}} \left(\frac{q\Pi F_2}{\alpha p_{p\min}} \right)^{0,5} \left(\frac{M}{T} \right)^{0,25};$$

$$S_{OH} > \frac{q\Pi L F_1}{N p_{p\min}}.$$

Технико-экономическая оптимизация системы откачки протяженной ВК с заданными характеристиками ($L, \alpha, a, q, p_{p\min}$) сводится к определению шага, числа и характеристики ВН, обеспечивающих номинальные вакуумные параметры при минимальных стоимости или эксплуатационных затратах. Прин-

ципальная возможность ее осуществления определяется следующими обстоятельствами: при увеличении числа насосов и, следовательно, сокращении их шага давление в ВК уменьшается; сокращение шага приводит к снижению требуемой БД насосов; удельные стоимость и энергопотребление ВН по мере уменьшения БД возрастают (см. рис. 6, 7).

Для анализа однородной ВС достаточно рассмотреть, как и в случае коллекторной откачки, участок камеры длиной l , откачиваемый двумя насосами (параметры $p_{он1}, S_{он1}, p_{он2}, S_{он2}$), расположенными на его краях. Используя зависимости вида (43), для камеры произвольного профиля при $q = const$ можно получить уравнение

$$\frac{\omega q l (2l_1 - l)}{a^2} \left(\frac{M}{T}\right)^{0,5} + q \Pi \left(\frac{l_1}{S_{он1}} - \frac{l - l_1}{S_{он2}}\right) + p_{он1} - p_{он2} = 0, \quad (49)$$

где ω - безразмерный коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения камеры, равный 0,41 для круглой и квадратной камер и $0,103 (1 + \xi)^2 / \xi^2$ - для прямоугольной; l_1 - расстояние от первого насоса до сечения камеры, в котором давление максимальное.

Решение (49) позволяет найти это сечение. В большинстве ВУ для откачки однородных протяженных ВК используют одинаковые насосы. Тогда

$$S_{он1} = S_{он2}; p_{он1} = p_{он2}; l_1 = 0,5l.$$

Применяя аналогичный подход к ВС в целом, содержащей N насосов (рис. 13), можно записать

$$p_{max} = p_{он} + \frac{1}{N} q \Pi L + \frac{1}{N^2} \frac{q \omega}{4} \left(\frac{M}{T}\right)^{0,5} \left(\frac{L}{a}\right)^2; \quad (50a)$$

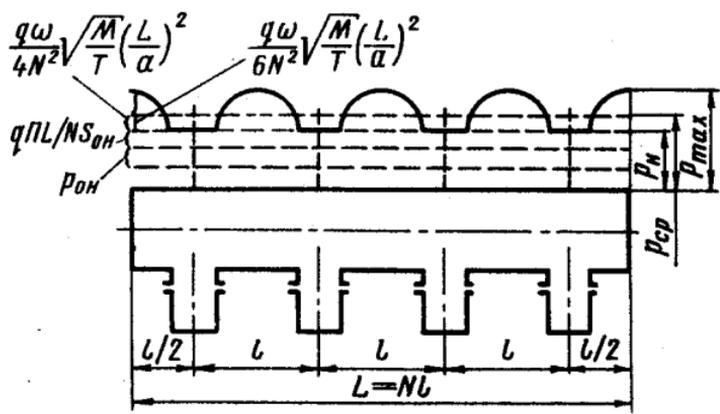


Рис. 13. Распределение и компоненты давления в протяженной камере с однородной газовой нагрузкой q

$$P_{ср} = P_{он} + \frac{1}{N} q \Pi L +$$

$$\frac{1}{N^2} \frac{q \omega}{G} \left(\frac{M}{T} \right)^{0,5} \left(\frac{L}{a} \right)^2, \quad (50б)$$

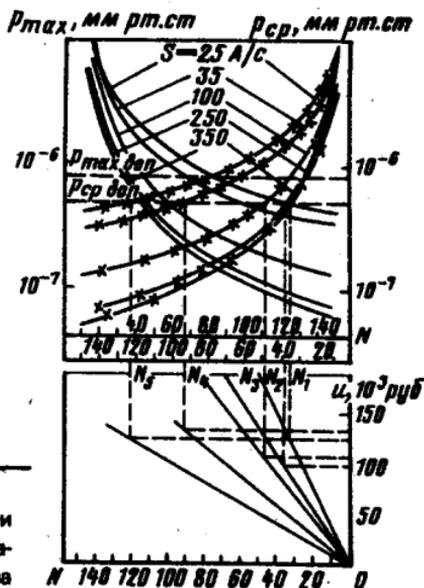


Рис. 14. Зависимость максимального (—) и среднего (— x —) давлений в протяженной камере и стоимости откачного оборудования от числа и быстроты действия насосов

причем две из искоемых величин, входящих в формулы (50), связаны очевидным неравенством

$$S_{он} > \frac{1}{N} \frac{q \Pi L}{P_{мин}} \quad (51)$$

Выбрав в соответствии с (51) несколько пар значений $S_{он}$ и N , зависимости (50а) и (50б) можно представить в виде семейства кривых с параметром $S_{он}$ (верхний график на рис. 14). Абсциссы этих кривых в точках $P_{max доп}$ и $P_{ср доп}$ дают минимальное необходимое количество ВН для каждого из выбранных значений $S_{он}$. Построив теперь зависимости полной стоимости откачного оборудования различной единичной производительности от числа ВН (нижний график на рис. 14) и сопоставив полученные значения, можно найти оптимальный вариант, дающий минимальную стоимость всего откачного оборудования. Как видно из рис. 14, таким вариантом в данном случае являются насосы с $S_{он} = 250$ л/с. После выбора насоса необходимо проверить, насколько совпадает устанавливающееся в нем давление [сумма первых двух членов в формуле (50)] с величиной $P_{н.отт}$ для насосов данного типа.

Аналогичным образом система откачки может быть минимизирована по эксплуатационным расходам.

В общем случае система уравнений, описывающих распределение давления в протяженной неоднородной ВК с произвольно расположенными насосами в совокупности с набором функций, описывающих стоимостные характеристики ВН и других ЭВС, представляет собой математическую модель ВС и явля-

ется основой ее оптимального проектирования. При создании достаточно сложных систем для этих целей может использоваться ЭВМ.

III. ОБЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

1. МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Метод статистических испытаний, называемый также методом Монте-Карло (ММК), состоит в математическом моделировании движения отдельных Мл в анализируемых вакуумных структурах. Проследивая траектории достаточно большого числа Мл (вплоть до нескольких десятков тысяч), можно получить наглядную картину течения РГ и вычислить как параметры состояния газа, так и интегральные характеристики ЭВС или ВС в целом.

Точность получаемых результатов возрастает с увеличением числа прослеженных траекторий N , погрешность расчетов пропорциональна $N^{-0,5}$.

В стандартный алгоритм счета методом МК (рис. 15) входят следующие операции:

блок - вычислительная операция;

Б1 - ввод исходных данных (задание Пв рассматриваемого ЭВС в аналитическом виде $F_j(x, y, z) = 0$, коэффициентов β на каждой из этих Пв, источников газа и т. п.);

Б2 - выбор координат (x_0, y_0, z_0) вылетающей с поверхности Мл с помощью датчика случайных чисел (ДСЧ);

Б3 - выбор направления движения Мл с помощью ДСЧ (задание траектории в аналитическом виде $x = x_0 + v_x t, y = y_0 + v_y t, z = z_0 + v_z t$ в обычном предложении, что все Мл движутся с одинаковой скоростью $v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{0,5} = 1$);

Б4 - определение точек пересечения траекторий Мл с поверхностями путем нахождения корней системы

$$\left. \begin{aligned} F_j(x, y, z) &= 0 \\ x &= x_0 + v_x t \\ y &= y_0 + v_y t \\ z &= z_0 + v_z t \\ t_1, t_2 \dots t_n \end{aligned} \right\};$$

Б5 - идентификация Пв, на которую попала частица, путем определения минимального положительного корня $t^* = \min\{t_i\}_{i=1,2,\dots,n}$ и координаты точки падения $(x, y, z) = x_0 + v_x t^*, y_0 + v_y t^*, z_0 + v_z t^*$. Далее переход на блок, соответствующий идентифицированной

В1 - переход на этот блок происходит в том случае, если идентифицированная в блоке Б5 Пв является выходным отверстием ЭВС. Фиксирование факта вылета Мл из ЭВС и передача информации в блок Б6;

П1 - переход на этот блок происходит в том случае, если идентифицированная в блоке Б5 Пв является одной из ограничивающих ("твердых") поверхностей ЭВС.

Оценивается вероятность захвата Мл этой Пв и в зависимости от результата происходит переход на блок П2 ("Мл захвачена поверхностью") или П3 ("Мл отразилась от поверхности");

П2 - фиксирование факта захвата Мл поверхностью в точке (x, y, z) ;

П3 - выбор новой траектории движения в соответствии с принятой моделью взаимодействия Мл с поверхностью и возвращение в блок Б4.

Указанный анализ траекторий осуществляется до тех пор, пока данная Мл не будет захвачена какой-либо Пв (переход в блок П2) или не выйдет из структуры (переход в блок В1).

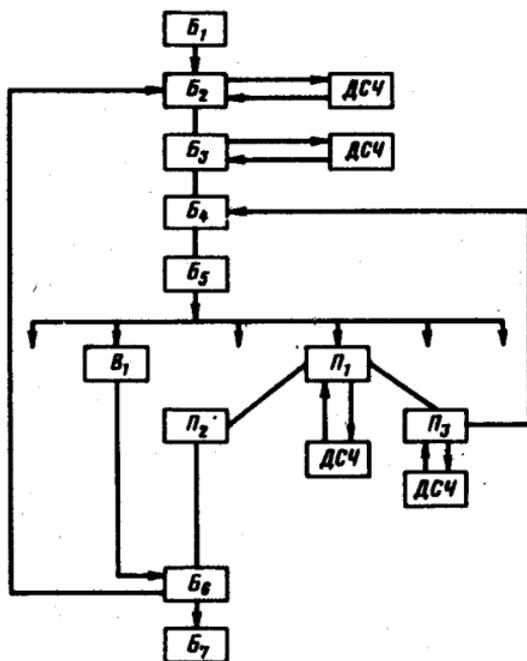


Рис. 15. Блок-схема вычислительных операций по методу Монте-Карло

Если число прослеженных соударений превышает заранее фиксированную величину, то наблюдение за данной Мл прекращается и начинается моделирование движения следующей. Доля таких Мл определяет погрешность вычислений;

Б6 - выдача накопленной информации и выработка программы последующих действий. Если необходимая точность не достигнута, то моделирование продолжается, при обеспечении необходимой точности осуществляется переход на блок Б7;

Б7 - вывод полученных данных и прекращение вычислений.

Рассмотренный алгоритм универсален по содержанию получаемой информации. Он позволяет найти:

распределение плотности потока падающих, сорбированных и отраженных Мл на всех поверхностях ЭВС;

пространственное распределение плотности потока Мл, исходящих из структуры через любую возможную поверхность;

коэффициент проводимости ЭВС P ;

коэффициент захвата структуры с сорбирующими стенками Γ ;

коэффициент возврата Δ ;

средние значения длины пробега $\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\lambda}_i$ и времени жизни Мл в камере $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{t}_i$, связанные с очевидным соотношением $\bar{\lambda} = v \bar{t}$;

концентрацию Мл в области с центром в точке (x, y, z)

$$n(x, y, z) = Q [t] \Delta \bar{t},$$

где $Q [t]$ - общее количество Мл, поступающих в камеру за 1 с; $\Delta \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta t_i$ - средняя продолжительность пребывания каждой Мл внутри элементарного объема с центром в точке (x, y, z) .

Характер выполняемых методом Монте-Карло расчетов определяется объемом оперативной памяти и быстродействием используемых ЭВМ. Теоретически возможности его применения для расчета ВС неограничены.

2. МЕТОД УГЛОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Применение метода угловых коэффициентов (МУК), широко распространенного в теории лучистого теплообмена, для анализа ВС базируется на подобии законов распространения лучистых и молекулярных потоков. Это подобие выполняется в большинстве случаев и предполагает, что распределение Мл в пространстве подчиняется закону косинусов.

$$dQ = q_0 \cos \theta d\Omega dF, \quad (52)$$

где dQ - поток частиц, эмитируемых элементом поверхности dF или проходящих через этот элемент, направления движения

ния которых не выходят за пределы телесного угла $d\Omega$, образующего с нормалью к dF угол θ ;

$q_0 = \frac{1}{\pi} \frac{dR_{dF}}{dF}$ - плотность потока частиц с элемента dF , движущихся по нормали к dF в пределах единичного телесного угла;

dR_{dF} - полный поток частиц, эмитируемых элементом в пределах полушеры ($\Omega = 2\pi$).

Любую вакуумную структуру можно представить в виде совокупности элементов Пв, в пределах которых МлП однороден.

Рис. 16. Расчетная схема определения угловых коэффициентов

Для произвольной пары таких элементов и (рис. 16) в соответствии с (52) можно записать

$$dR_{dF_j dF_i} = \frac{1}{\pi} dR_{dF_j} \cos \theta_j d\Omega_{ji}, \quad (53)$$

где $dR_{dF_j dF_i}$ - молекулярный поток, падающий с элемента поверхности dF_j непосредственно на элемент dF_i .

Поскольку $d\Omega_{ji} = \frac{dF_i \cos \theta_i}{r^2}$,

выражение (53) можно представить в виде

$$dR_{dF_j dF_i} = d\psi_{dF_j dF_i} dR_{dF_j}, \quad (54)$$

$$\text{где } d\psi_{dF_j dF_i} = \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r^2} dF_i \quad (55)$$

- дифференциальный УК, по своему физическому смыслу определяющий долю Мл из числа эмитируемых элементом dF_j , падающих непосредственно на элемент dF_i , т. е. вероятность прямого массообмена между этими двумя элементами.

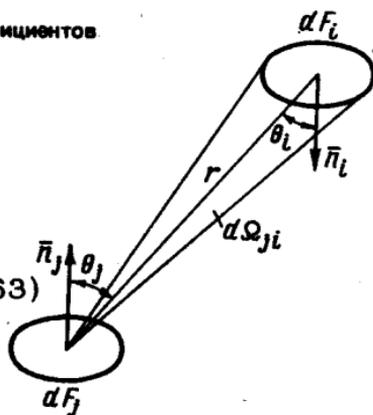
Интегрируя (55), можно получить локальный УК

$$d\psi_{dF_j F_i} = \int_{F_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r^2} dF_i, \quad (56)$$

определяющий вероятность прямого массообмена между элементами dF_j и поверхностью F_i , и средний УК

$$\psi_{F_j F_i} = \frac{1}{F_j} \int_{F_j} \int_{F_i} \frac{\cos \theta_j \cos \theta_i}{\pi r^2} dF_j dF_i, \quad (57)$$

определяющий вероятность прямого массообмена между поверхностями F_j и F_i .



поток, поглощаемый Пв:

$$Q_{\text{полгл}i} = (1 - \gamma_i) Q_{\text{пад}i} = \frac{1 - \gamma_i}{\Delta} \sum_{j=1}^n \psi_{ji} \Delta_j; \quad (64)$$

поток, отражаемый Пв:

$$Q_{\text{отпр}i} = \gamma_i Q_{\text{пад}i} = \frac{\gamma_i}{\Delta} \sum_{j=1}^n \psi_{ji} \Delta_j; \quad (65)$$

поток, эмитируемый Пв:

$$Q_i = Q_{\text{дес}i} + Q_{\text{отпр}} = \frac{\Delta_i}{\Delta}. \quad (66)$$

В формулах (63) - (66)

$$\Delta = \begin{vmatrix} (1 - \gamma_1 \psi_{11}) & -\gamma_1 \psi_{21} \dots - \gamma_1 \psi_{i1} \dots - \psi_{n1} \gamma_1 \\ -\gamma_2 \psi_{12} & (1 - \gamma_2 \psi_{22}) \dots - \gamma_2 \psi_{i2} \dots - \gamma_2 \psi_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\gamma_n \psi_{1n} & -\gamma_n \psi_{2n} \dots - \gamma_n \psi_{in} \dots & (1 - \gamma_n \psi_{nn}) \end{vmatrix}$$

$$\Delta_i = \begin{vmatrix} (1 - \gamma_1 \psi_{11}) & -\gamma_1 \psi_{21} \dots & Q_{\text{дес}i1} \dots - \gamma_1 \psi_{n1} \\ -\gamma_2 \psi_{12} & (1 - \gamma_2 \psi_{22}) \dots & Q_{\text{дес}i2} \dots - \gamma_2 \psi_{n2} \\ \dots & \dots & \dots \\ -\gamma_n \psi_{1n} & -\gamma_n \psi_{2n} & Q_{\text{дес}in} \dots (1 - \psi_{nn} \gamma_n) \end{vmatrix}$$

"Открытые" Пв анализируемой структуры, т. е. сечения ее стыковки с другими ЭВС (например, входное отверстие насоса поверхностного действия), рассматриваются как некоторые условные поверхности, создающие "десорбционные" потоки (равные, естественно, потоку в структуру из присоединенного к ней ЭВС) и имеющие $\gamma = 0$.

Определенные по формулам (63) - (66) величины $Q_{\text{пад}}$, $Q_{\text{полгл}}$, $Q_{\text{отпр}}$ совместно с заданными значениями $Q_{\text{дес}}$ позволяют найти пространственное распределение потоков, интегральные характеристики структуры и производные от них параметры анализируемой ВС.

Таким образом, анализ распределения МлП рассматриваемым методом при заданных величинах сорбционно-десорбционных характеристик Пв сводится к расчету УК. Эти коэффициенты для наиболее распространенных комбинаций Пв даны в табл. 13.

Описанная методика дает приближенные результаты. Причина этого состоит в замене принципиально непрерывного распределения плотности падающего на стенки потока дискретным.

Для повышения точности вычислений необходимо увеличивать число n , т. е. количество участков (зон), на которые разбивается анализируемая структура и в пределах которых сорбционно-десорбционные характеристики и плотности падающих потоков принимаются постоянными. При этом, однако, быстро возрастает трудоемкость вычислительных работ, поскольку число уравнений вида (61) увеличивается пропорционально n , а количество используемых УК - пропорционально n^2 . Поэтому

Таблица 13

Угловые коэффициенты для некоторых
геометрических струннур

Взаимное расположение и форма поверхности	Схема	Величина углового коэффициента
1. Тело, не имеющее возмущений, находится внутри другого тела		$\varphi_{11} = 0; \quad \varphi_{21} = \frac{F_2}{F_1};$ $\varphi_{12} = 1$
2. Два одинаковых прямоугольника, расположенные в параллельных плоскостях друг против друга		$\varphi_{12} = \frac{2}{\pi xy} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{(1+x^2)(1+y^2)}{1+x^2+y^2} + y\sqrt{1+x^2} \operatorname{arctg} \frac{y}{\sqrt{1+x^2}} + x\sqrt{1+y^2} \operatorname{arctg} \frac{x}{\sqrt{1+y^2}} - y \operatorname{arctg} y - x \operatorname{arctg} x \right];$ $x = \frac{a}{b}; \quad y = \frac{b}{a}; \quad \varphi_{21} = \varphi_{12}$
3. Две бесконечно длинные пластины, расположенные в параллельных плоскостях друг против друга		$\varphi_{12} = \sqrt{\frac{1}{4}(x+1)^2 + y^2} - \sqrt{\frac{1}{4}(x-1)^2 + y^2};$ $\varphi_{21} = \varphi_{12} \frac{1}{x}; \quad x = \frac{l_2}{l_1}; \quad y = \frac{h}{l_1}$
4. Цилиндр с полушарическим дном		$\varphi_{21} = x\sqrt{1+x^2} - x^2; \quad \varphi_{12} = \varphi_{21} \frac{F_2}{F_1};$ $\varphi_{22} = \frac{1}{2}; \quad \varphi_{23} = \frac{1}{2} + x^2 - x\sqrt{1+x^2};$ $\varphi_{32} = \varphi_{23} \frac{F_2}{F_3}; \quad x = \frac{h}{d}$
5. Цилиндр с коническим дном		$\varphi_{21} = x\sqrt{2}\sqrt{1+x^2} - x^2\sqrt{2}; \quad \varphi_{12} = \varphi_{21} \frac{F_2}{F_1};$ $\varphi_{22} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,2929;$ $\varphi_{32} = \frac{1}{\sqrt{2}} + x^2\sqrt{2} - x\sqrt{2}\sqrt{1+x^2};$ $x = h/d$
6. Сфера и соосный диск		$\varphi_{12} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{1+x^2}}$ $x = \frac{r}{a}$
7. Сфера и соосный концентричный цилиндр		$\varphi_{12} = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}; \quad x = \frac{a}{r}$

Взаимное расположение и форма поверхности	Схема	Величина углового коэффициента
8. Сфера и соосный неконцентричный цилиндр		$\varphi_{12} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{x}{1+x^2}} - \sqrt{\frac{y}{1+y^2}} \right];$ $\varphi_{21} = \frac{z^2}{x \cdot y} \left[\sqrt{\frac{x}{1+x^2}} - \sqrt{\frac{y}{1+y^2}} \right];$ $x = \frac{a_2}{r}; y = \frac{a_1}{r}; z = \frac{r_1}{r}$
9. Сфера и элементарный соосный цилиндр		$d\varphi_{r_1, dF_2} = \frac{dy}{2(1+y^2)^{3/2}}; y = \frac{a}{r};$ $d\varphi_{dF_2, F_1} = \frac{z^2}{(1+y^2)^{3/2}}; z = \frac{r_1}{r}$
10. Сфера и кольцо		$\varphi_{12} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{1}{x^2+1}} - \sqrt{\frac{1}{y^2+1}} \right];$ $\varphi_{21} = \frac{2z^2}{y^2-x^2} \left[\sqrt{\frac{1}{x^2+1}} - \sqrt{\frac{1}{y^2+1}} \right];$ $x = \frac{r_1}{a}; y = \frac{r_2}{a}; z = \frac{r_3}{a}$
11. Диск и кольцо		$\varphi_{12} = \frac{1}{2(x^2-y^2)} \left[x^2 y^2 + \sqrt{(1+x^2+y^2)^2 - 4y^2 z^2} - \sqrt{(1+z^2+x^2)^2 - 4x^2 z^2} \right];$ $\varphi_{21} = \frac{1}{2z^2} \left[x^2 - y^2 + \sqrt{(1+z^2+y^2)^2 - 4y^2 z^2} - \sqrt{(1+z^2+x^2)^2 - 4x^2 z^2} \right];$ $x = \frac{r_2}{a}; y = \frac{r_1}{a}; z = \frac{r_3}{a}$
12. Кольцо и цилиндр		$\varphi_{12} = \frac{1}{2(x^2-y^2)} \left[\sqrt{(1+t^2+x^2)-4x^2} - \sqrt{(1+z^2+x^2)^2-4x^2} - \sqrt{(1+t^2+y^2)^2-4y^2} - \sqrt{(1+z^2+y^2)^2-4y^2} \right];$ $\varphi_{21} = \frac{x^2-y^2}{2(t-z)} \varphi_{12};$ $x = \frac{r_2}{r_3}; y = \frac{r_1}{r_3}; z = \frac{a_1}{r_3}; t = \frac{a_2}{r_3}$

Взаимное расположение и форма поверхности	Схема	Величина углового коэффициента
13. Цилиндр и цилиндр		$\varphi_{12} = \frac{1}{4\pi} \left[2xt + (x+z)\sqrt{(x+z)^2 + t^2} - z\sqrt{z^2 + t^2} - (x+t+z)\sqrt{(x+t+z)^2 + t^2} + (t+z)\sqrt{(t+z)^2 + t^2} \right];$ $\varphi_{21} = \frac{x}{t} \varphi_{12};$ $x = \frac{a}{r}; \quad t = \frac{c}{r}; \quad z = \frac{b}{r}$

число зон при инженерных расчетах необходимо разумно ограничивать.

При проектировании и геометрической оптимизации ряда типовых вакуумных структур, например, насосов поверхностного действия, вычислительная процедура может быть существенно упрощена путем использования табличных значений разрешающих угловых коэффициентов. Эти коэффициенты связывают плотность МлП в одном из сечений структуры (например, в плоскости входного отверстия насоса) с плотностью потока, падающего на некоторую другую Пв (например, на боковую Пв насоса) с учетом возможных перетражений отдельных Мл на остальных Пв. Поэтому их применение исключает необходимость решения системы вида (62). Разрешающие УК представляются обычно графически для конкретной структуры как функция относительных размеров и коэффициентов прилипания образующих ее ПВ (рис. 17).

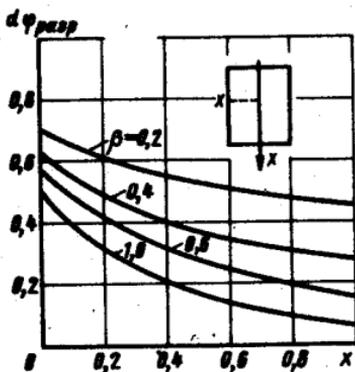


Рис. 17. Разрешающий угловой коэффициент "входное отверстие-боковая поверхность" цилиндра с сорбирующими стенками $\alpha\varphi_{разр} = \frac{q_x}{q_0}$ при различных значениях коэффициента прилипания β , зависимости от положения точки x :

$q_0(r) = \text{const } q_x$ — плотность потока газа, падающего на входное отверстие насоса и на элементарную площадку вокруг точки x соответственно

К настоящему времени УК рассчитаны или вычислены для большого числа структур. Поэтому МУК приобретает все большее значение при анализе стационарных МлП и расчета ВС. Его применение, однако, допустимо лишь при выполнении условия (52), т. е. при диффузном рассеянии МлП стенкой.

3. ИНТЕГРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД

Основу этого метода составляет интегральная форма кинетического уравнения (уравнения Больцмана), которое, как уже подчеркивалось в разд. I, подразд. 1, лежит в основе молекулярно-кинетической теории газов. Поэтому интегрально-кинетический метод (ИКМ) обладает наибольшей физической содержательностью и универсальностью. В его рамках могут быть решены любые инженерные задачи, связанные с анализом пространственно-временного распределения МлП и синтезом ВС.

Теоретическое рассмотрение кинетического уравнения позволяет записать для произвольно выбранной точки с радиусом-вектором \vec{r} , расположенной внутри некоторой вакуумной структуры:

$$f(\vec{r}, \vec{v}, t) = \frac{1}{|v_n|} \Phi(\vec{r}_F, \vec{v}, \tau_F); \quad (67)$$

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_0; \quad (68)$$

$$\Phi_1(\vec{r}_F, \vec{v}, \tau_F) = r(\vec{r}_F, \tau_F) \iiint_{v_{1n} < 0} |v_{1n}| f(\vec{r}_F, \vec{v}_1, \tau_F) \times \kappa(\vec{v}_1, \vec{v}, \vec{n}, T) d\vec{v}_1, \quad (69)$$

где \vec{r}_F — радиус-вектор точки на одной из образующих структуру Пв, отвечающей условию, что Мл, вылетевшая с элементарной площадки вокруг этой точки в момент времени τ_F , попадает без столкновений в точку \vec{r} в момент времени t ;

\vec{n} — единичный вектор нормали к поверхности F в точке \vec{r}_F ;

v_n — проекция скорости Мл на нормаль;

$\Phi_1(\vec{r}_F, \vec{v}, t)$ — характеристическая функция поверхности F_1 , отвечающая условию, что $\Phi_1 dF d\vec{v} d\tau$ есть число Мл, покидающих элементарную площадку dF за время $d\tau$ со скоростью, лежащей в интервале скоростей $(\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v})$;

$\kappa d\vec{v}$ — вероятность того, что Мл, упавшая на элементарную

площадку со скоростью \bar{v} , покидает ее со скоростью, лежащей в интервале скоростей $(\bar{v}, \bar{v} + d\bar{v})$; иными словами, функция распределения эмитируемых поверхностей частиц в векторном поле скоростей.

В формуле (68) слагаемое Φ_1 соответствует потокам отражаемых поверхностью Мл и частиц, эмитируемых ею в результате стимулированной десорбции; слагаемое Φ_0 соответствует потоку "собственных" Мл с поверхности, т. е. распределенному потоку теплового ГВ и потоку из локализованного газового источника, если такой там имеется.

Поскольку в подавляющем большинстве случаев множества векторов V_i (скорость Мл, попадающих на поверхность F_i) и V (скорость Мл, эмитируемых этой поверхностью) взаимонезависимы, выражение (69) можно переписать в виде

$$\Phi_1(\bar{r}_F, \bar{v}, \tau_F) = \gamma(\bar{r}_F, \tau_F) \nu(\bar{r}_F, \tau_F) w(\bar{v}, \bar{n}, T), \quad (70)$$

где в соответствии с формулой (7) плотность потока Мл на стенку в области \bar{r}_F

$$\nu(\bar{r}_F, \tau_F) = \iiint_{v_{1n} < 0} |v_{1n}| f(\bar{r}_F, \bar{v}_1, \tau_F) d\bar{v}_1. \quad (71)$$

Совокупность формул (67) - (71) устанавливает количественную связь между ФР в области вблизи точки \bar{r} и плотностью потока в другой области анализируемой структуры вблизи точки \bar{r}_F . Полагая, что область \bar{r} принадлежит некоторой Пв вблизи точки \bar{r}_{Fj} , эту связь можно представить в виде

$$\nu(\bar{r}_{F_i}, t) = \iiint_{v_{ni} < 0} \frac{|v_{ni}|}{|v_{nj}|} \left[\gamma(\bar{r}_{F_j}, \tau_{F_j}) \nu(\bar{r}_{F_j}, \tau_{F_j}) \times \right. \\ \left. \times w(\bar{v}, \bar{n}_j, T_j) + \Phi_0(\bar{r}_{F_j}, \bar{v}, \tau_{F_j}) \right] d\bar{v}, \quad (72)$$

где \bar{n}_j - нормаль к Пв вблизи точки \bar{r}_{F_j} , отвечающей условию, что вылетевшая оттуда со скоростью \bar{v} в момент времени τ_{F_j} Мл в момент t попадает на стенку вблизи точки \bar{r}_{F_i} , т. е. $\tau_{F_j} = t - \frac{(\bar{r}_{F_i} - \bar{r}_{F_j}) \cdot \bar{v}}{v}$.

Принимая, что анализируемая ВС состоит из m поверхностей с заданными параметрами γ и Φ_0 , область интегрирования в уравнении (72) можно считать состоящей из m частей и соответственно представить (72) в виде

$$\nu(\bar{r}_{F_i}, t) = \sum_{j=1}^m \iiint_{A_{ij}} \frac{|v_{ni}|}{|v_{nj}|} \left[\gamma(\bar{r}_{F_j}, \tau_{F_j}) \nu(\bar{r}_{F_j}, \tau_{F_j}) w(\bar{v}, \bar{n}_j, T) \right] d\bar{v} = \\ = \sum_{j=1}^m \iiint_{A_{ij}} \frac{|v_{ni}|}{|v_{nj}|} \times \Phi_0(\bar{r}_{F_j}, \bar{v}, \tau_{F_j}) d\bar{v} \quad i=1, 2 \dots m, \quad (73)$$

где A_{ij} - множество скоростей Мл, вылетающих из произвольной точки поверхности F_j и падающих в точку \bar{r}_{F_i} .

Распределение МлП в анализируемой структуре и другие ее параметры могут быть получены решением системы уравнений вида (73) записанных для каждой из m поверхностей. Для приведения этой системы к виду, допускающему аналитическое решение, каждая поверхность F_i разбивается на k_i зон, в каждой из которых принято $v = \text{const}$. В итоге получается система линейных алгебраических уравнений вида

$$\sum_{j=1}^p a_{ij} v_j = \sum_{j=1}^p \theta_{ij}, \quad (74)$$

где

$$a_{ij} = \delta_{ij} - r_j \iiint_{A_{ij}} \frac{|v_{n_i}|}{|v_{n_j}|} w d\bar{v}_i; \quad p = \sum_{j=1}^m k_j;$$

$$\theta_{ij} = \iiint_{A_{ij}} \frac{|v_{n_i}|}{|v_{n_j}|} \Phi_0(\bar{r}_{F_j}, \bar{v}) d\bar{v}; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$$

Коэффициенты a_{ij} для типовых комбинаций Пв приведены в табл. 14. ФР эмитируемых поверхностью частиц составляет: при диффузном рассеянии [формула (52)]

$$f(\bar{v}) = \frac{2}{\pi} \left(\frac{m_0}{2kT_j} \right)^2 v \exp \left(-\frac{m_0 v^2}{2kT_j} \right); \quad (75a)$$

при изотропном рассеянии

$$f(\bar{v}) = 2 \left(\frac{m_0}{2\pi kT_j} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m_0 v^2}{2kT_j} \right). \quad (75b)$$

Свободный член θ_{ij} определяется величиной и характером потока "собственных" Мл с данной зоны поверхности F_j и записывается в виде:

для источника с косинусным распределением плотности потока

$$\theta_{ij} = \frac{2v_0}{\pi} \left(\frac{m_0}{2kT_j} \right)^2 \iiint_{A_{ij}} |v_{n_i}| \exp \left(-\frac{m_0 v^2}{2kT_j} \right) d\bar{v}; \quad (76a)$$

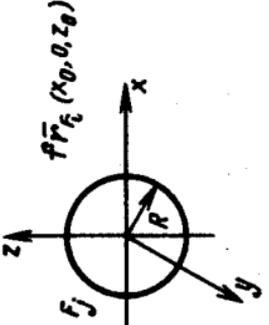
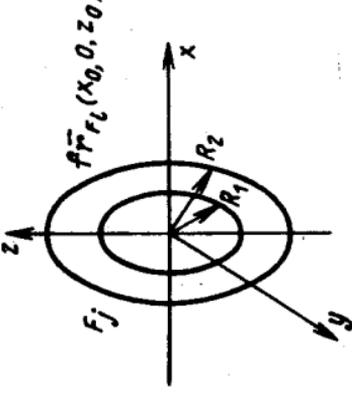
для источника с однородным распределением плотности потока

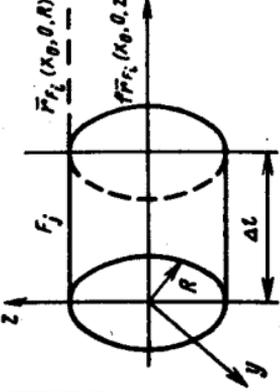
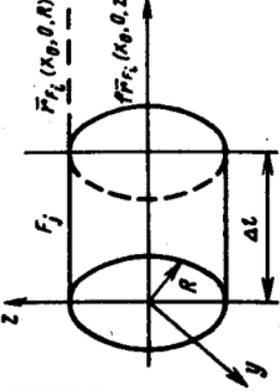
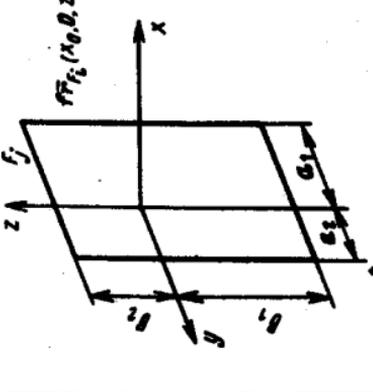
$$\theta_{ij} = 2v_0 \left(\frac{m_0}{2\pi kT_j} \right)^{3/2} \iiint_{A_{ij}} \frac{|v_{n_i}|}{|v_{n_j}|} \exp \left(-\frac{m_0 v^2}{2kT_j} \right) d\bar{v}. \quad (76b)$$

При отсутствии источника $\Phi_{0j} = 0$ и $\theta_{ij} = 0$.

Решение системы (74) дает величины v на всех зонах; далее по формуле (70) рассчитываются значения характеристических функций Φ_j всех Пв. После этого могут быть легко

Коэффициенты a_{ij} для тильовых геометрических структур

Геометрическая структура	Коэффициенты a_{ij}	изотропное рассеяние
диффузное рассеяние		
 <p style="text-align: center;">F_j R $\vec{r}_{F_j}(x_0, 0, z_0)$</p>	$-Y_j \frac{R^2 x_0}{(x_0^2 + z_0^2)^{3/2}}, \quad x_0 \gg R$	
 <p style="text-align: center;">F_j R_1 R_2 $\vec{r}_{F_j}(x_0, 0, z_0)$</p>	$- \frac{Y_j}{2} \left[\frac{R_2^2 - (x_0^2 + z_0^2)}{\sqrt{(R_2^2 + x_0^2 + z_0^2)^2 - 4z_0^2 R_2^2}} - \frac{R_1^2 - (x_0^2 + z_0^2)}{\sqrt{(R_1^2 + x_0^2 + z_0^2)^2 - 4z_0^2 R_1^2}} \right]$	$-Y_j \frac{x_0}{\rho} \int_0^{\rho} \frac{\rho - R_2}{\rho} \frac{\rho \cos \varphi - (x_0^2 + z_0^2)}{(x_0^2 + z_0^2 \sin^2 \varphi + x_0^2 + z_0^2 + \rho^2 - 2z_0 \rho \cos \varphi)} d\varphi$

1	2	3
<p>(a) </p> <p>(б) </p>	<p>(a) $-\frac{Y_j}{2R} \left[\Delta z + \frac{(x_0 - \Delta z)^2 + 2R^2}{\sqrt{(x_0 - \Delta z)^2 + 4R^2}} - \frac{x_0^2 + 2R^2}{\sqrt{x_0^2 + 4R^2}} \right]$</p> <p>(б) $-\frac{Y_j}{2} \left[\frac{x_0^2 + z_0^2 - R^2}{\sqrt{(x_0^2 + z_0^2 + R^2)^2 - 4z_0^2 R^2}} - \frac{(x_0 - \Delta z)^2 + z_0^2 - R^2}{\sqrt{((x_0 - \Delta z)^2 + z_0^2 + R^2)^2 - 4z_0^2 R^2}} \right]$</p>	<p>$-\frac{Y_j}{2R} \int_{\xi=0}^{\xi=\Delta z} \sqrt{(x_0 - \xi)^2 + 2R^2} (1 - \cos \varphi) d\varphi$</p> <p>$-\frac{Y_j}{2} \int_{\xi=0}^{\xi=\Delta z} \sqrt{(x_0 - \xi)^2 + z_0^2 + R^2 - 2z_0 R \cos \varphi} d\varphi$</p>
<p></p>	<p>$-\frac{Y_j}{2R} \left[\frac{a_2}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} \left(\arctg \frac{z_0 - \theta_1}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} - \arctg \frac{z_0 - \theta_2}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} \right) - \frac{z_0 - \theta_1}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} \left(\arctg \frac{z_0 - \theta_1}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} - \arctg \frac{z_0 - \theta_2}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} \right) + \frac{z_0 - \theta_2}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} \left(\arctg \frac{z_0 - \theta_1}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} - \arctg \frac{z_0 - \theta_2}{\sqrt{x_0^2 + a_1^2}} \right) - \frac{a_2}{\sqrt{x_0^2 + (z_0 - \theta_1)^2}} \left(\arctg \frac{z_0 - \theta_1}{\sqrt{x_0^2 + (z_0 - \theta_1)^2}} - \arctg \frac{z_0 - \theta_2}{\sqrt{x_0^2 + (z_0 - \theta_1)^2}} \right) - \frac{a_2}{\sqrt{x_0^2 + (z_0 - \theta_2)^2}} \left(\arctg \frac{z_0 - \theta_1}{\sqrt{x_0^2 + (z_0 - \theta_2)^2}} - \arctg \frac{z_0 - \theta_2}{\sqrt{x_0^2 + (z_0 - \theta_2)^2}} \right) \right]$</p>	<p>$-\frac{Y_j}{2R} \left[\arctg \frac{a_2(z_0 - \theta_1)}{x_0 \sqrt{x_0^2 + a_1^2 + (z_0 - \theta_1)^2}} - \arctg \frac{a_2(z_0 - \theta_2)}{x_0 \sqrt{x_0^2 + a_1^2 + (z_0 - \theta_2)^2}} \right] + \arctg \frac{a_1(z_0 - \theta_1)}{x_0 \sqrt{x_0^2 + a_2^2 + (z_0 - \theta_1)^2}} - \arctg \frac{a_1(z_0 - \theta_2)}{x_0 \sqrt{x_0^2 + a_2^2 + (z_0 - \theta_2)^2}} \right]$</p>

найлены искомые параметры молекулярных потоков и ЭВС. В частности:

молекулярная концентрация в любой точке в соответствии с (6) и (67)

$$n(\vec{r}) = \iiint \frac{1}{|v_{nF}|} \Phi(\vec{r}_{Fi}, \vec{v}) d\vec{v}, \quad (77)$$

где интегрирование ведется по всему векторному полю скоростей;

\vec{r}_F плотность потока в заданном направлении вблизи точки произвольного сечения F

$$v(\vec{r}_F) = \iiint_A \frac{|v_{nF}|}{|v_{n_i}|} \Phi(\vec{r}_{Fi}, \vec{v}) d\vec{v}, \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (78)$$

и поток через это сечение

$$Q_F = \iint_F v(\vec{r}_F) dF, \quad \text{с}^{-1}, \quad (79)$$

где $A = \{v_{nF} > 0\}$, если направление потока совпадает с нормалью к поверхности \vec{n}_F и $A = \{v_{nF} < 0\}$, если это направление противоположно \vec{n}_F ; коэффициент проводимости Tr или системы Tr [(см. формулу (40)]

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{K_{\text{вых}}} v_i F_i}{v_0 F}, \quad (80)$$

где $K_{\text{вых}}$ - число зон, на которые разбито выходное сечение; v_0 - плотность входящего в Tr потока во входном сечении F_0 ; коэффициент захвата ЭВС с сорбирующими стенками

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{K_{\text{вых}}} v_i F_i}{v_0 F_0}, \quad (81)$$

где $K_{\text{вых}}$ - число зон, на которые разбито входное сечение; v_i - плотность выходящего из ЭВС потока; v_0 - плотность входящего в ЭВС потока во входном сечении F_0 .

Столь же просто могут быть вычислены коэффициент возврата в системе "объект - ВК", построена диаграмма плотности потока в любом сечении и определены другие параметры молекулярных потоков и ЭВС.

Как пример применения этого метода, на рис. 18 показаны коэффициенты захвата насосов поверхностного действия различной конфигурации.

Как и метод угловых коэффициентов, ИКМ дает приближенные результаты, точность которых возрастает с увеличением числа зон. На этот метод не налагаются, однако, ограничения стационарности потоков и диффузности их рассеивания стенкой, присущие МУК. Поэтому ИКМ может рассматриваться как наиболее общий аналитический метод решения проектных задач вакуумного аппарата- и приборостроения.

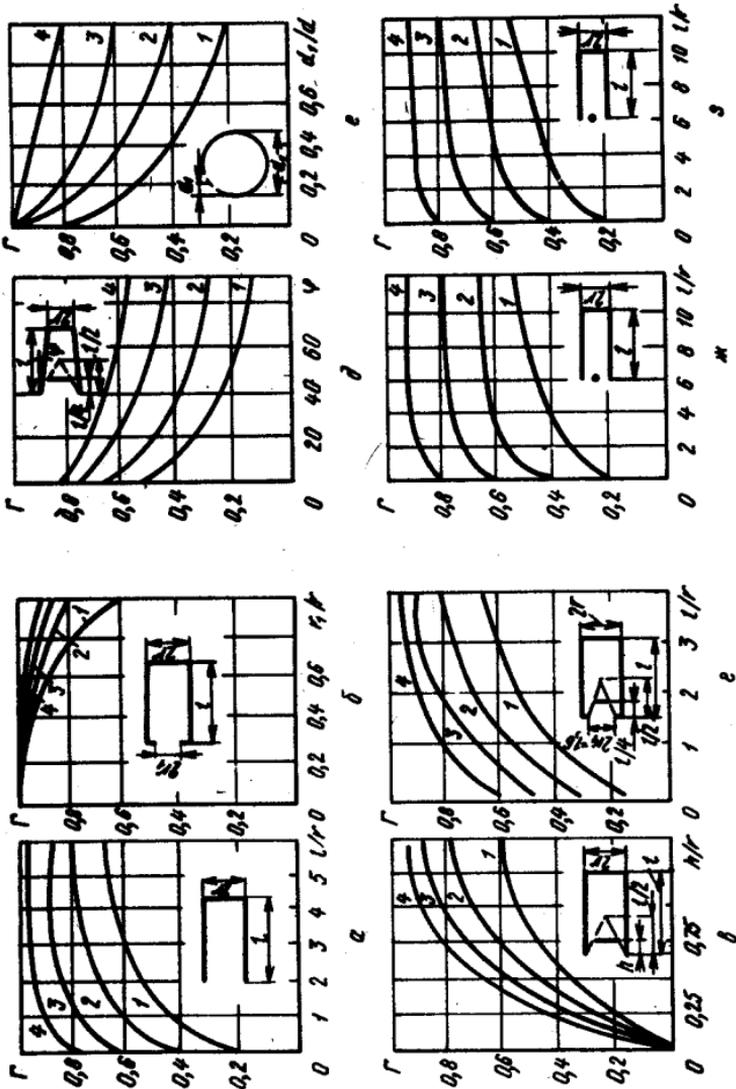


Рис. 18. Коэффициенты захвата некоторых сорбирующих структур при различных значениях коэффициента γ :

1 — 0,8; 2 — 0,6; 3 — 0,4; 4 — 0,2.

а-е — структуры присоединены к вакуумной камере с изотропным распределением молекулярного потока; ж — структура присоединена к камере с 4π — симметричным источником газа; з — структура присоединена к камере с квазиточечным газовым источником, характеризующимся косинусоидальным распределением плотности потока по оси структуры; для б, в, д $l/r = 3$; для г $r_1/r = 0,8$

4. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

При анализе сложных многокомпонентных ВС непосредственное использование описанных выше методов становится затруднительным из-за ограничений вычислительного характера. Метод эквивалентных поверхностей (МЭП) позволяет обойти эти трудности.

Сущность МЭП состоит в последовательном упрощении расчетной схемы анализируемой структуры путем замены отдельных ее компонентов так называемыми эквивалентными поверхностями (ЭП). Последним приписываются некоторые характеристические функции, вид которых определяется из условий тождественности уравнений баланса газовых потоков в области ЭП и заменяемых ими компонентов. Например, за ЭП для подсоединенного к камере насоса принимается плоскость его входного сечения. Этой плоскости приписываются те же свойства взаимодействия с газовым потоком, которыми обладает заменяемый ею насос. В частности, ей приписываются эквивалентный коэффициент прилипания $\beta_{ЭП}$, численно равный коэффициенту захвата насоса, и некоторая функция $\Phi_{ЭП}$. Эта функция описывает пространственное распределение потока Мл, истекающего из входного отверстия насоса, если его коэффициент захвата $\Gamma < 1$.

Таким образом, в рамках МЭП многокомпонентная вакуумная структура любой геометрической сложности, содержащая произвольное количество распределенных и локализованных газовых источников, ограничивающих их стенок и сорбирующих поверхностей, может быть в конечном итоге приведена простой эквивалентной схемой, легко поддающейся дальнейшему анализу.

Необходимо подчеркнуть, что МЭП не стоит в одном ряду с МлП и не заменяет другие методы анализа МлП, а является лишь эффективным математическим приемом. Применение МЭП снимает ограничения масштабов практического использования методов ММК, МУК и ИКМ, связанные с геометрической сложностью анализируемых структур. Будучи в этом смысле универсальным, МЭП с равным успехом может быть использован совместно с любым из этих трех методов. Для определенности в данном подразделе он изложен с позиций интегрально-кинетического метода.

МЭП принадлежит к числу итерационных методов, поскольку определение характеристических функций $\beta_{ЭП}$ и $\Phi_{ЭП}$ возможно в принципе только методом последовательных приближений. Это обстоятельство диктуется тем, что обе искомые фун-

кции зависят от ФР входящего в заменяемые компоненты потока, которая к началу расчета, естественно, неизвестна.

В качестве первого приближения пространственное распределение обоих потоков (падающего на входное отверстие заменяемой компоненты и покидающего эту компоненту) - можно считать диффузным Γ см, формулу (75а) J . Поэтому на первом этапе расчета для вводимой ЭП можно положить

$$\beta_{ЭПВ} = \Gamma_{диф} \quad (82)$$

$$и \quad \Phi_{ЭПВ} = w(\bar{v}) v(\bar{r}_{ЭПВ}) (1 - \Gamma_{диф}), \quad (83)$$

где $\Gamma_{диф}$ - коэффициент захвата заменяемой компоненты в предположении изотропного распределения потока (см., например, поз. а на рис. 18).

В частности, для "элементарных" цилиндрической и конической структур (рис. 19)

$$\Phi_{ЭПВ} = \frac{2v}{\pi} r \left(\frac{m_0}{2KT} \right)^2 v \cos \alpha \left[\sigma' \psi_0 + (1 - \sigma') \alpha \right] \exp \left(- \frac{m_0 v^2}{2KT} \right), \quad (83a)$$

где для цилиндрической структуры (рис. 19, а)

$$\cos \alpha = \left(1 - \frac{z'^2 \rho^2 \sin^2 \psi}{R^2 (z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi)} \right)^{0,5};$$

$$f = \left[z'^2 - 2z' (z' \rho \cos \psi) \left(1 - \frac{L}{x_2} \right) + (z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi) \left(1 - \frac{L}{x_1} \right)^2 \right]^{0,5}; \quad \sigma' = \begin{cases} 0, & f > R \\ 1, & f \leq R \end{cases}$$

для конической структуры (рис. 19, б)

$$\alpha = \arccos \cos \left[\frac{(z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi) t^* - z' (z' - \cos \psi \rho)}{[R - x' t q \psi_0 (1 - t^*)] (x'^2 + z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi)^{0,5}} \right] - \psi_0;$$

$$t^* = \frac{z' (z' - \rho \cos \psi) - x' t q \psi_0 (x' t q \psi_0 - R) + D}{z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi - x'^2 t q^2 \psi_0};$$

$$D = \left\{ [z' (z' - \rho \cos \psi) - x' t q \psi_0 (x' t q \psi_0 - R)]^2 - [z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi - x'^2 t q^2 \psi_0] x [z'^2 + (x' t q \psi_0 - R)^2] \right\}^{0,5}; \quad \sigma' = \begin{cases} 1, & f \leq R \\ 0, & f > R \end{cases}$$

для сферической структуры (рис. 19, в)

$$\Phi_{ЭПВ} = \frac{2v}{\pi} r \left(\frac{m_0}{2KT} \right)^2 v \cos \alpha \exp \left(- \frac{m_0 v^2}{2KT} \right), \quad (83б)$$

D

где $\cos \alpha = \frac{D}{R (x'^2 + z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi)^{0,5}};$

$$D = \left\{ (x'^2 + z'^2 - x'h - z' \rho \cos \psi)^2 - (x'^2 + z'^2 + \rho^2 - 2z' \rho \cos \psi) [(x' - h)^2 + z'^2 - R^2] \right\}^{0,5}.$$

В формулах (83) γ - коэффициент взаимодействия МЛП с поверхностью "элементарной" структуры; ν - плотность потока, падающего на ее входное отверстие.

Далее для анализируемой структуры составляется система уравнений вида (73) с использованием для введенной ЭП характеристической функции (83). Решение этой системы дает распределение ν_i для всех поверхностей, в том числе и для ЭП. Следовательно, становится возможным составление системы уравнений вида (73) для замененной компоненты; определение корней этой системы позволяет найти $\Phi_{ЭПВ}$ во втором приближении и далее повторять цикл аналогичных вычислений до тех пор, пока изменения искомых величин с каждым шагом не будут в пределах допустимого.

Необходимое число приближений зависит от двух параметров - отношения суммарной площади ЭП к площади поверхностей всей анализируемой структуры и от параметра γ для поверхностей заменяемых компонентов. Чем меньше эти параметры, тем быстрее заканчивается итерационный процесс.

Как пример практического использования МЭП на рис. 20 приведены результаты расчета распределения молекулярной концентрации внутри цилиндрической имитационной камеры со сферическим объектом, расположенным в ее центре. Стенки каме-

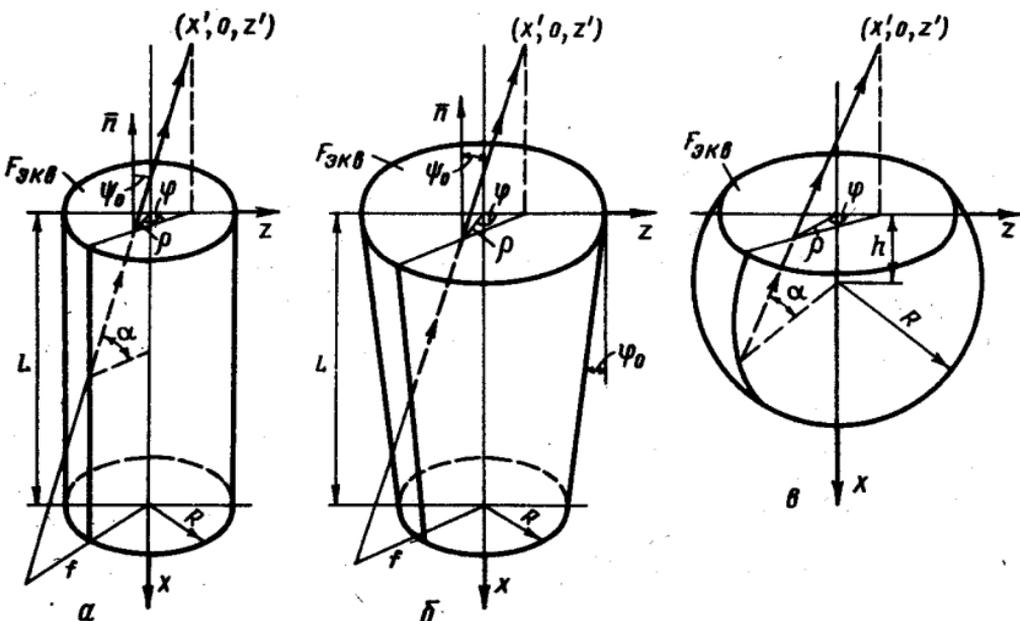
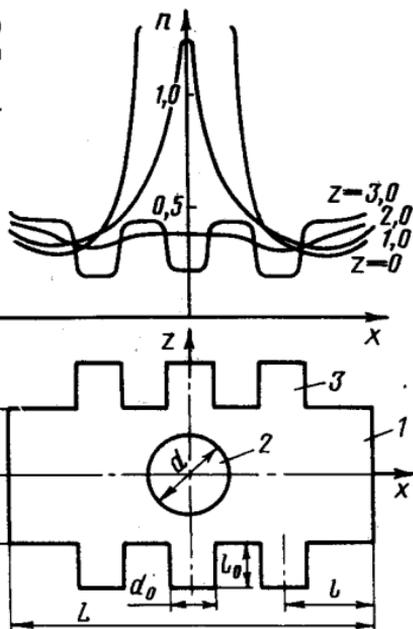


Рис. 19. Расчетная схема для определения $\Phi_{ЭКВ}$ для цилиндрической (а), конической (б) и сферической (в) структур

Рис. 20. Распределение молекулярной концентрации в полости вакуумной камеры, откачиваемой тремя поясами насосов:

1 — камера; 2 — сферический испытываемый объект; 3 — вакуумные насосы; $n = \bar{n} \left(\frac{\pi m_0}{2kT} \right)^{0,5}$



ры и объект являются распределенными источниками газа с плотностью потока соответственно $3,6 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ и $10^{16} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$; камера откачивается тремя поясами насосов поверхностного действия ($\beta = 0,6$); в каждом поясе расположено 8 насосов. При расчете принято: $D = 6 \text{ м}$; $L = 8 \text{ м}$; $d = 2 \text{ м}$; $d_0 = 1 \text{ м}$; $l_0 = 2 \text{ м}$; $l = 2 \text{ м}$; каждый насос заменяется ЭП; количество зон — 15, в том числе на цилиндрической поверхности камеры — 7, на ее торцах — по две и на поверхности объекта — 4. Результаты расчетов в первом и втором приближениях совпадают с точностью до 3-го знака.

Как видно из этого примера, МЭП позволяет рассчитывать макроскопические параметры газа и интегральные характеристики ВС практически неограниченной сложности, обеспечивая при этом заранее заданную точность. Для большинства инженерных расчетов необходимая точность достигается уже на первом этапе решения, с использованием табулированных значений характеристических функций.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какими соотношениями связаны между собой параметры состояния идеального равновесного газа?
2. В чем сущность и каков вид функций распределения молекул по скоростям и энергиям в идеальном равновесном газе?
3. Каков физический смысл кинетического уравнения?
4. Каковы причины неадекватности понятий "молекулярная концентрация" и "давление" для некоторых состояний разреженного газа?
5. В чем состоят качественные особенности движения газов в трубопроводах в зависимости от числа Кнудсена?

6. Дайте подробные определения основных характеристик вакуумных систем и их элементов.

7. Какова последовательность проектировочного расчета вакуумной системы с сосредоточенными параметрами?

8. По каким критериям выбирается тип и быстрота действия вакуумных насосов?

9. Каковы наиболее характерные компоненты газовой нагрузки:

- а) в вакуумно-технологическом оборудовании;
- б) в высоковакуумных исследовательских установках?

10. Как осуществляется выбор вакуумных насосов в системах со ступенчатой откачкой?

11. Какими методами может быть рассчитана пропускная способность различных элементов вакуумных систем?

12. В чем состоит принцип и какова методика оптимизации систем откачки протяженных вакуумных камер?

13. Каким образом определяются коэффициенты проводимости, захвата и возврата по методу Монте-Карло?

14. В чем состоят физические предпосылки применимости теории лучистого теплообмена для анализа молекулярных потоков? Что такое угловые коэффициенты? Какие ограничения присущи методу угловых коэффициентов?

15. В чем заключаются принципиальные особенности интегрально-кинетического метода анализа молекулярных потоков? Каковы ее преимущества перед методами Монте-Карло и угловых коэффициентов?

16. В чем состоит сущность метода эквивалентных поверхностей? Каковы практические возможности его применения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глазков А. А., Малышев И. Ф., Саксаганский Г. Л. Вакуумные системы электрофизических установок. — М.: Атомиздат, 1975. — 192 с.

2. Гуревич Л. С., Саксаганский Г. Л. Принципы и основные соотношения при расчете вакуумных систем методом угловых коэффициентов. — Инженерно-физический журнал, т. XXIII, 1972, № 4, с. 38 — 45.

3. Дзшман С. Научные основы вакуумной техники. — М.: Мир, 1964. — 716 с.

4. Ершов Б. Д., Саксаганский Г. Л. Интегрально-кинетический метод анализа молекулярных потоков. Ч.1. Основные положения. Ч.П. Поток в элементарных структурах с произвольным значением коэффициента взаимодействия. — Журнал технической физики, XI, УП, 1977, вып. 7, с. 12 — 22.

5. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. Я. Конструирование и расчет вакуумных систем. — М.: Энергия, 1970, — 504 с.

6. Розанов Л. Н. Вакуумные машины и установки. Л.: Машиностроение, 1975. — 336 с.

7. Саксаганский Г. Л., Котельников Ю. Н., Малев М. Д. и др. Сверхвысокий вакуум в радиционно-физическом аппаратостроении. — М.: Атомиздат, 1976. — 288 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
I. Важнейшие понятия вакуумной техники.....	7
1. Основные представления молекулярно-кинетической теории газов.....	7
2. Режимы течения газов в трубопроводах.....	11
3. Характеристики вакуумных систем и их элементов.....	16
4. Принципы классификации и содержание проектной разработки вакуумных систем.....	23
II. Основы проектирования вакуумных систем.....	27
1. Методика проектировочного расчета.....	27
2. Источники газовой нагрузки.....	30
3. Выбор откачных средств.....	37
4. Пропускная способность элементов вакуумных систем.....	46
5. Особенности проектирования вакуумных систем с распределенными параметрами.....	50
III. Общие методы расчета вакуумных систем.....	56
1. Метод статистических испытаний.....	56
2. Метод угловых коэффициентов.....	58
3. Интегрально-кинетический метод.....	65
4. Метод эквивалентных поверхностей.....	72
Вопросы для самопроверки.....	75
Список литературы.....	76