

БЫКОВ Д.В., НЕСТЕРОВ С.Б., САБИРЗЯНОВ Н.Р.

**РАСЧЕТ СЛОЖНЫХ ВАКУУМНЫХ
СИСТЕМ**

МГИЭМ, 2003

1. ВВЕДЕНИЕ.

В настоящее время для расчета сложных криовакуумных систем используются модели, основывающиеся на применении достаточно сложного математического аппарата (метод пробной частицы Монте-Карло, метод угловых коэффициентов [1] и др.). На начальном этапе проектирования нецелесообразно применять сложные методы расчета, так как это может привести к значительным временным затратам, а результат расчета может показать принципиальную невозможность создания такой системы по каким-либо причинам. Ввиду этого возникает необходимость создания методов, обеспечивающих приемлемую точность расчета и не приводящих к существенным затратам временных ресурсов.

В работе [2] была предложена методика расчета насосов поверхностного действия осесимметричных структур. Большинство разработанных на сегодняшний день насосов имеют именно такую структуру. Таким образом, данный метод позволяет решить достаточно большой класс задач.

Основные допущения и предпосылки, используемые в методике:

1. Существование молекулярного режима течения в структуре: ($Kn \gg 1$). При обычных размерах насосов поверхностного действия условия свободно молекулярного режима сохраняются до давлений 0,1 – 0,01 Па.

2. Пространственная плотность распределения частиц в объеме поглощающей структуры однородна в сечениях ортогональных оси симметрии.

3. Скорости частиц, движущихся в объеме и вылетающих с поверхности, не зависят от их предыстории и имеют диаграмму, соответствующую косинусному распределению (рис. 1).

2-е и 3-е условия выполняются только при небольших значениях коэффициента прилипания, так как при больших значениях коэффициентов прилипания, близких к 1 возможно образование лучевых эффектов за счет фокусировки потока. Это может иметь место при значительных температурных градиентах в поглощающей структуре. Кроме того, исследования проведенные на кафедре низких температур в МЭИ [3], показали, что предположение о косинусном распределении скоростей частиц является достаточно грубым. Например, на выходе из испытательной камеры структура молекулярного потока существенно отличается от косинусного закона (рис. 2).

В то же время для откачных устройств с нераспыляемыми газопоглотителями активность их геттерной поверхности сравнительно низка, а расчеты методом

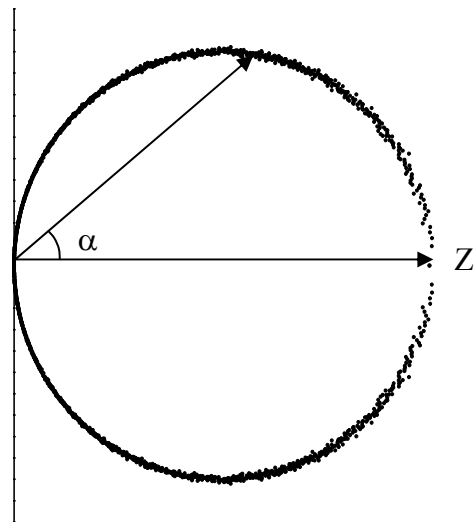


Рис. 1. Диаграмма скоростей частиц, соответствующая косинусному распределению (в полярных координатах).

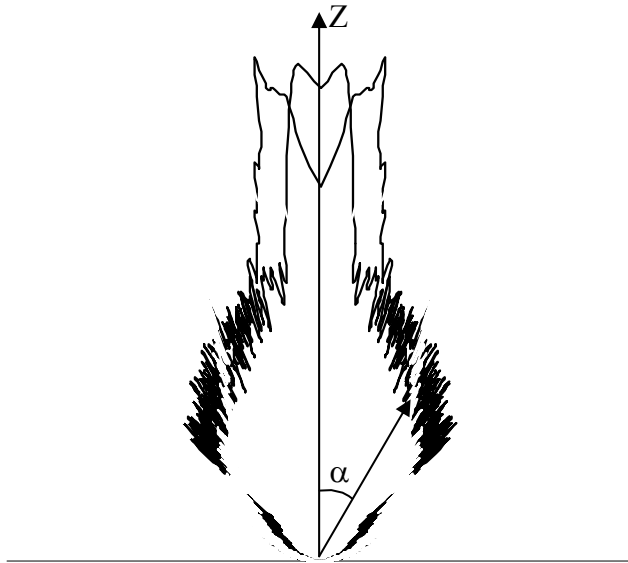


Рис. 2. Реальная диаграмма скоростей частиц на выходе из испытательной камеры.

Монте-Карло показали, что даже значительные отклонения от косинусного распределения незначительно сказываются на конечных результатах.

В работе [2] предлагается следующая методика расчета. Одним из основных параметров насосов поверхностного действия является коэффициент захвата [4,5,6], определяющийся отношением числа молекул, поглощенных в насосе к числу молекул, падающих в насос из какого-то объема V (см. рис.3). Таким образом, если $N(x)$ – число частиц, влетающих в сечение, а $M(x)$ – число частиц вылетающих из сечения, то коэффициент захвата определяется соотношением:

$$\sigma(x) = \frac{N(x) - M(x)}{N(x)},$$

а коэффициент отражения определится следующим образом: $\beta(x) = \frac{M(x)}{N(x)}$

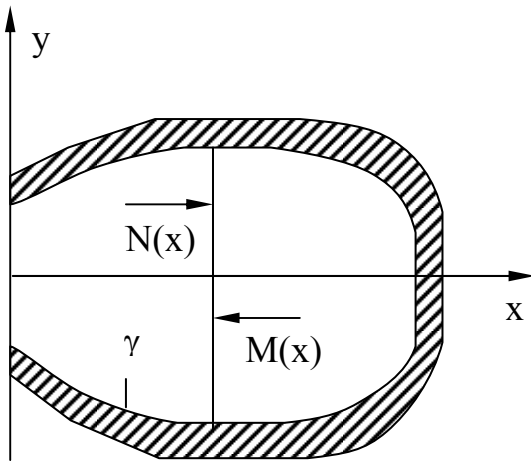


Рис.3. Определение коэффициентов захвата, отражения и пропускания.

и предположим, что за это время коэффициент прилипания практически не меняется, а также, что вероятности взаимодействия частиц с поверхностью поглотителя не зависят от величины и знака их скорости.

Рассмотрим уравнение баланса частиц в элементарном объеме (рис. 4).

Коэффициент пропускания определяется из баланса: $\alpha + \beta + \sigma = 1$ ¹. Коэффициенты α , β и σ зависят от следующих характеристик поглощающей структуры: вероятности поглощения частицы γ , плотностей вероятности $P_v^{\pm}(x)$ взаимодействия частицы с поверхностью, если частица находится в потоке $M(x)$ или $N(x)$, и от вероятностей $P_{\pm}(x)$ отражения частицы соответственно в положительном и отрицательном направлении. Причем для вероятностей отражения справедливо: $P_+(x) + P_-(x) = 1$.

Ограничимся вычислением коэффициента захвата на малых отрезках времени

¹ Здесь и далее: α , β , σ и γ соответственно коэффициенты пропускания, отражения, захвата и прилипания.

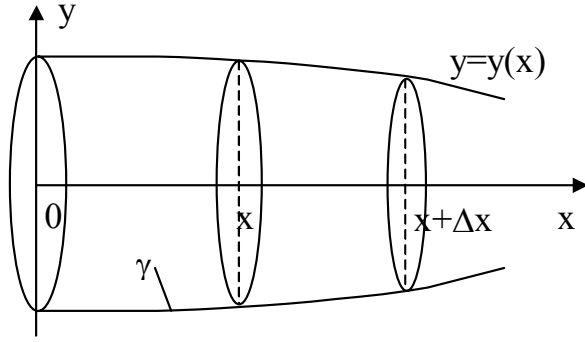


Рис. 4. К выводу уравнений баланса частиц, находящихся в объеме вакуумной камеры.

В потоке молекул, движущихся в положительном направлении, число частиц, взаимодействующих с поверхностью поглотителя, равно $N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x$, остальные $N(x) \cdot (1 - P_v^+(x)) \cdot \Delta x$ не сталкиваются с поверхностью. Из взаимодействующих частиц поглотится $\gamma \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x$, а $(1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x$ молекул отразится от поверхности.

Таким образом, получаем соотношения баланса:

$$\begin{aligned} N(x) &= N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x + N(x) \cdot (1 - P_v^+(x)) \cdot \Delta x; \\ N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x &= \gamma \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x + (1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x; \\ (1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x &= \\ &= (1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x \cdot P_+(x) + (1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x \cdot P_-(x) \end{aligned}$$

Из которых следует, что $(1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x \cdot P_-(x)$ частиц переходят из потока N в поток M.

Для потока M получаем аналогичные соотношения:

$$\begin{aligned} M(x) &= N(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x + M(x) \cdot (1 - P_v^-(x)) \cdot \Delta x; \\ M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x &= \gamma \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x + (1 - \gamma) \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x; \\ (1 - \gamma) \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x &= \\ &= (1 - \gamma) \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x \cdot P_+(x) + (1 - \gamma) \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x \cdot P_-(x) \end{aligned}$$

При этом $(1 - \gamma) \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x \cdot P_+(x)$ частиц переходят из потока M в поток N.

Таким образом, система уравнений баланса частиц имеет вид:

$$\begin{aligned} N(x + \Delta x) &= N(x) \cdot [1 - \gamma \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x - (1 - \gamma) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x \cdot P_-(x)] + \\ &+ (1 - \gamma) \cdot M(x) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x \cdot P_+(x); \\ M(x + \Delta x) &= M(x) \cdot [1 - \gamma \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x - (1 - \gamma) \cdot P_v^-(x) \cdot \Delta x \cdot P_+(x)] + \\ &+ (1 - \gamma) \cdot N(x) \cdot P_v^+(x) \cdot \Delta x \cdot P_-(x); \end{aligned}$$

Далее осуществляется предельный переход от Δx к dx . В итоге получается система уравнений баланса частиц, летящих в положительном и отрицательном направлении:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dx} = -(\gamma^+ + \alpha_+) \cdot N + \alpha_- \cdot M \\ \frac{dM}{dx} = (\gamma^- + \alpha_-) \cdot M - \alpha_+ \cdot N \end{cases} \quad (1)$$

$$\alpha_+ = (1 - \gamma) \cdot P_v^+(x) \cdot P_-(x);$$

$$\alpha_- = (1 - \gamma) \cdot P_v^-(x) \cdot P_+(x);$$

$$\gamma^+ = \gamma \cdot P_v^+(x);$$

$$\gamma^- = \gamma \cdot P_v^-(x).$$

Так как, в соответствии с определением: $\frac{d\sigma(x)}{dx} = \left(\frac{N(x) - M(x)}{N(x)} \right)'$, а $\frac{d\beta(x)}{dx} = \left(\frac{M(x)}{N(x)} \right)'$, то, сделав соответствующие математические преобразования, можно получить следующие дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma}{dx} = (1-\gamma) \cdot P_V^+ \cdot P_+ \cdot \sigma^2 + (\gamma \cdot (P_V^+ + P_V^-) + \\ + (1-\gamma)(P_V^+ \cdot P_V^- - P_V^- \cdot P_+)) \cdot \sigma - \gamma \cdot (P_V^+ + P_V^-); \\ \frac{d\beta}{dx} = -(1-\gamma) \cdot P_V^+ \cdot P_+ \cdot \beta^2 + (\gamma \cdot (P_V^+ + P_V^-) + \\ + (1-\gamma)(P_V^+ \cdot P_V^- + P_V^- \cdot P_+)) \cdot \beta - (1-\gamma) \cdot (P_V^+ \cdot P_V^-). \end{cases} \quad (2)$$

Причем граничными условиями будут следующие соотношения:

$\sigma(x=0) = \sigma$, $\sigma(x=L) = \gamma$ (данное соотношение справедливо, если структура имеет дно при $x = L$); $\beta(x=0) = \beta$, $\beta(x=L) = 1 - \gamma$ (данное соотношение справедливо, если структура имеет дно при $x = L$).

Вероятности взаимодействия и отражения определяются следующим образом. В соответствии с косинусным распределением, рассеивание на стенке происходит по вероятностному закону с плотностью вероятности $P(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha$ (рис. 5).

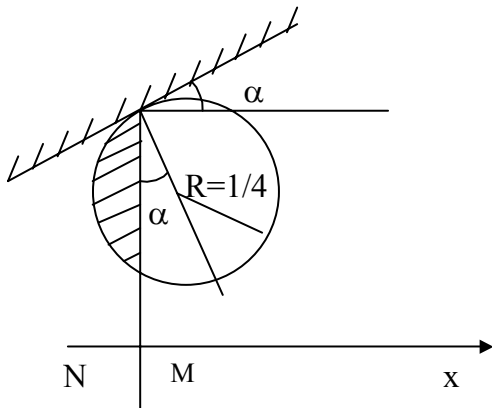


Рис. 5. Определение вероятности отражения частицы в потоки $N(x)$ и $M(x)$.

Для частицы, столкнувшейся с поверхностью в точке x и избежавшей поглощения, вероятность $P_+(x)$ вылета в положительном направлении оси x (поток N) равна:

$$P_+(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \int_0^\alpha \cos \alpha \cdot d\alpha = \frac{1}{2} + \frac{y'(x)}{2\sqrt{1+(y'(x))^2}}.$$

Вероятность отражения в поток M вычисляется аналогично:

$$P_-(x) = \frac{1}{2} - \frac{y'(x)}{2\sqrt{1+(y'(x))^2}}.$$

Вывод формул для плотностей вероятности взаимодействия $P_V^\pm(x)$ молекул

с боковой поверхностью поглощающей структуры основан на предположении о независимом характере распределений по скоростям и координатам [6].

Рассмотрим частицы потока N . Частицы, находящиеся в объеме (рис. 6) либо сталкиваются с боковой поверхностью, либо вылетают через правое сечение. Отношение числа молекул которые вылетая из объема в потоке N могут попасть на боковую поверхность структуры, к числу всех частиц, вылетающих из объема в этом потоке, равно отношению боковой поверхности $S_\delta = 2\pi \cdot y(x) \cdot \sqrt{1+(y'(x))^2}$ к полной поверхности $S_n = S_\delta + \pi \cdot y^2(x)$: $P_\delta(x) \cdot \Delta x = \frac{S_\delta}{S_n} \approx \frac{2}{y(x)} \cdot \sqrt{1+(y'(x))^2} \cdot \Delta x$, $P_\delta(x)$

имеет смысл плотности вероятности прохождения частиц вблизи поверхности структуры.

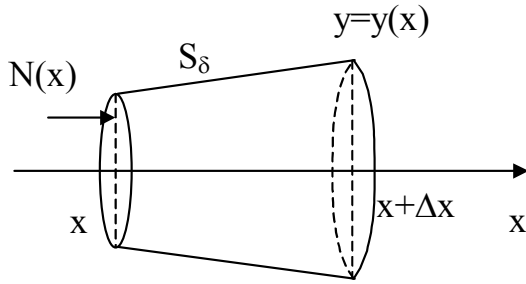


Рис. 6. Определение вероятности нахождения частицы вблизи поверхности.

, где $\alpha(x)$ – угол наклона поглощающей поверхности в точке x .

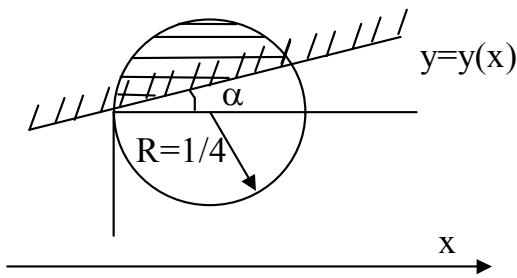


Рис. 7. Определение вероятности столкновения частицы с поверхностью.

При условии, что скорости частиц в потоке N распределены по косинусному закону (рис. 7), для молекул, находящихся вблизи поверхности структуры, вероятность столкновения с поверхностью равна заштрихованной площади:

$$P_e^+(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \int_0^\alpha \cos \varphi \cdot d\varphi = \frac{1}{2} - \frac{y'(x)}{2\sqrt{1+(y'(x))^2}}$$

Аналогично для $P_e^-(x)$ в потоке M :

$$P_e^-(x) = \frac{1}{2} + \frac{y'(x)}{2\sqrt{1+(y'(x))^2}}.$$

Плотность вероятности $P_e(x)$ частицы оказаться вблизи поверхности определяется законом пространственного распределения частиц, а вероятности столкновения $P_v^\pm(x)$ зависят от распределения частиц в пространстве скоростей. Полагая, что эти распределения независимы, получаем выраже-

ние для вероятности взаимодействия с поверхностью в потоке N :

$$P_v^+(x) = \frac{2\sqrt{1+(y'(x))^2}}{y(x)} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{y'(x)}{2\sqrt{1+(y'(x))^2}} \right],$$

и в потоке M :

$$P_v^-(x) = \frac{2\sqrt{1+(y'(x))^2}}{y(x)} \cdot \left[\frac{1}{2} + \frac{y'(x)}{2\sqrt{1+(y'(x))^2}} \right].$$

Уравнения (2) допускают точное решение для областей с кусочно-линейной границей [4]. В качестве примера использования системы (2) выведем аналитическую зависимость коэффициента захвата от коэффициента прилипания и геометрических характеристик для конической области: $y(x) = \kappa \cdot x + y_0$, $0 \leq x \leq x_0$. Используя соотношения для вероятностей получим:

$$P_+(x) = \frac{1}{2} + \frac{\kappa}{2\sqrt{1+\kappa^2}} = \kappa_+ = const; P_-(x) = \frac{1}{2} - \frac{\kappa}{2\sqrt{1+\kappa^2}} = const;$$

$$P_v^+(x) = \frac{2\sqrt{1+\kappa^2}}{y(x)} \cdot \kappa_- = const = \frac{C_0}{y(x)} \cdot \kappa_-; P_v^-(x) = \frac{2\sqrt{1+\kappa^2}}{y(x)} \cdot \kappa_+ = const = \frac{C_0}{y(x)} \cdot \kappa_+$$

Подставляя полученные соотношения в (2), получим:

$$\sigma = f(x) \cdot (\sigma^2 + a \cdot \sigma - b) = f(x) \cdot (\sigma - \sigma_1) \cdot (\sigma - \sigma_2),$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4 \cdot b}}{2}, f(x) = \frac{(1-\gamma) \cdot \kappa_+^2 \cdot C_0}{y(x)},$$

$$a = \frac{\gamma + (1-\gamma) \cdot (\kappa_-^2 - \kappa_+^2)}{(1-\gamma) \cdot \kappa_+^2}, b = \gamma / (1-\gamma) \cdot \kappa_+^2$$

Далее, разделяем переменные:

$$\frac{d\sigma}{(\sigma - \sigma_1) \cdot (\sigma - \sigma_2)} = \left[\frac{1}{\sigma - \sigma_1} - \frac{1}{\sigma - \sigma_2} \right] \cdot \frac{d\sigma}{dx} =$$

$$= \frac{1}{\sigma_1 - \sigma_2} \cdot d \left[\ln \frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma - \sigma_2} \right] = f(x) \cdot dx$$

Интегрируя уравнение получаем: $\frac{\sigma - \sigma_1}{\sigma - \sigma_2} = C \cdot e^{(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \int f(x) \cdot dx}$. Константу C мож-

но найти из условия: $\sigma(x_0) = \gamma$. Проведя математические преобразования, и взяв крайний случай конической поверхности – цилиндр: $y(x) = y_0$, $0 \leq x \leq x_0$, получаем:

$$\sigma = \frac{\frac{2\sqrt{\gamma}}{(1+\sqrt{\gamma})} \cdot \left(\gamma + \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1-\sqrt{\gamma})} \right) + \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1-\sqrt{\gamma})} \cdot \left(\gamma - \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1+\sqrt{\gamma})} \right) \cdot e^{-\frac{4\sqrt{\gamma}}{D} L}}{\left(\gamma + \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1-\sqrt{\gamma})} \right) - \left(\gamma - \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1+\sqrt{\gamma})} \right) \cdot e^{-\frac{4\sqrt{\gamma}}{D} L}}$$

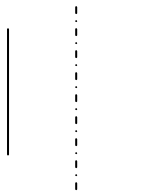
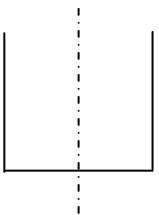
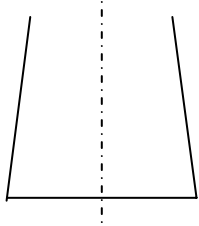
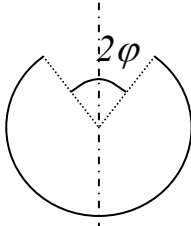
С помощью системы (2) в [2] были выведены соотношения для различных видов поверхностей, которые будут приведены ниже. Также будут приведены соотношения полученные в настоящей работе. Используя данные соотношения и применив описанный ниже алгоритм, инженер-проектировщик может получить характеристики большинства осесимметричных вакуумных систем.

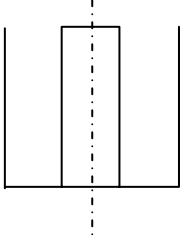
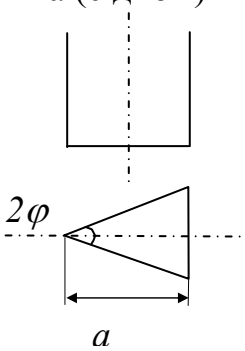
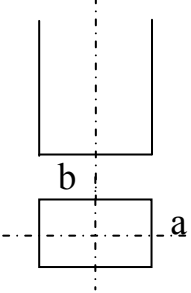
2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ.

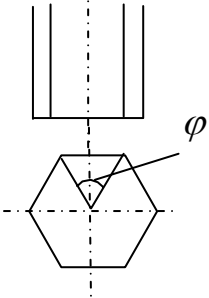
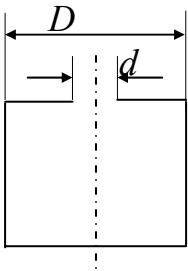
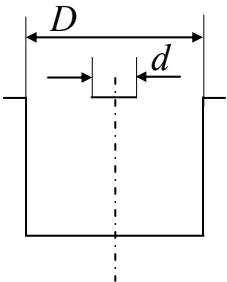
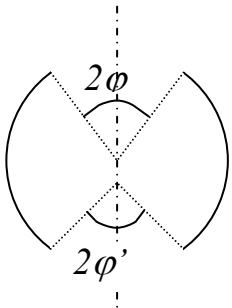
В таблице 1 приведены соотношения для расчета коэффициентов захвата различных вакуумных структур. Коэффициенты отражения и пропускания либо даются в явном виде, либо находятся по балансовым соотношениям. Необходимо учесть, что коэффициент пропускания глухой структуры (с дном) равен нулю.

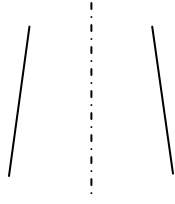
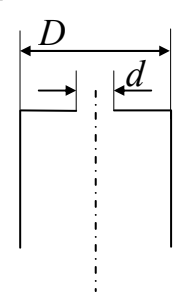
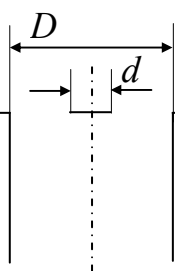
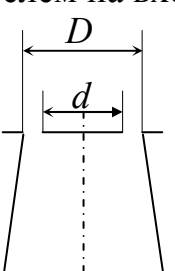
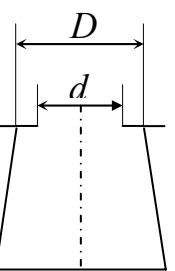
Соотношения были получены путем изменения граничных условий (см. Введение), а так же суммированием коэффициентов захвата и отражения двух граничных структур, с соответствующими весовыми коэффициентами, найденными из отношения площадей. Например: коэффициент захвата цилиндрической структуры с диафрагмой на входе и на выходе, может быть определен суммированием, с весовыми коэффициентами, коэффициентов захвата сквозной цилиндрической структуры с диафрагмой на входе и глухой цилиндрической структуры с диафрагмой на входе. Условные обозначения вышеупомянутых коэффициентов будут следующие: Например: σ_1 – коэффициент захвата из Таблицы, первой структуры.

Таблица 1. Аналитические соотношения, полученные в работе.

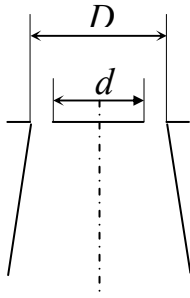
<p>1. Сквозной цилиндр</p>  <p>D и L – диаметр и длина цилиндра. (Далее L – длина структуры).</p>	$\sigma = 2 \frac{\sqrt{\gamma} \cdot \left(e^{\frac{2\sqrt{\gamma}L}{D}} - 1 \right)^2 + \gamma \cdot \left(e^{\frac{4\sqrt{\gamma}L}{D}} - 1 \right)}{(1 + \sqrt{\gamma})^2 \cdot e^{\frac{4\sqrt{\gamma}L}{D}} - (1 - \sqrt{\gamma})^2}$ $\beta = 2 \frac{(1 - \gamma) \cdot \left\{ \exp\left(\frac{4\sqrt{\gamma}L}{D}\right) - 1 \right\}}{(1 + \sqrt{\gamma})^2 \cdot e^{\frac{4\sqrt{\gamma}L}{D}} - (1 - \sqrt{\gamma})^2}$
<p>2. Цилиндр с дном</p>  <p>D – диаметр цилиндра.</p>	$\sigma = \frac{\frac{2\sqrt{\gamma}}{(1 + \sqrt{\gamma})} \cdot \left(\gamma + \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1 - \sqrt{\gamma})} \right) + \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1 - \sqrt{\gamma})} \cdot \left(\gamma - \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1 + \sqrt{\gamma})} \right) \cdot e^{-\frac{4\sqrt{\gamma}L}{D}}}{\left(\gamma + \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1 - \sqrt{\gamma})} \right) - \left(\gamma - \frac{2\sqrt{\gamma}}{(1 + \sqrt{\gamma})} \right) \cdot e^{-\frac{4\sqrt{\gamma}L}{D}}}$ $\beta = 1 - \sigma$
<p>3. Конус с дном</p>  <p>$d_{\text{вход}}$, $d_{\text{выход}}$ – входной и выходной диаметры конуса.</p>	$\sigma = \frac{\sigma_1 \cdot (\gamma - \sigma_2) - \sigma_2 \cdot (\gamma - \sigma_1) \cdot \exp\{(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot (F(x) - F(x_0))\}}{(\gamma - \sigma_2) - (\gamma - \sigma_1) \cdot \exp\{(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot (F(x) - F(x_0))\}};$ <p>здесь: $F(x) - F(x_0) = \frac{(1 - \gamma) \cdot k_+^2 \cdot 2 \cdot \sqrt{k + 1}}{k} \cdot \ln \left[\frac{d_{\text{вход}} / 2}{k \cdot L + d_{\text{вход}} / 2} \right]$</p> $\sigma_{1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4 \cdot b}}{2}, \quad a = \frac{\gamma + (1 - \gamma) \cdot (k_-^2 - k_+^2)}{(1 - \gamma) \cdot k_+^2},$ $b = \gamma / (1 - \gamma) \cdot k_+^2, \quad k = (d_{\text{выход}} - d_{\text{вход}}) / 2 \cdot L,$ $k_+ = P_+(x), \quad a \cdot k_- = P_-(x) - \text{см. введение.}$
<p>4. Сфера с углом раскрытия 2φ</p> 	$\sigma = \frac{2 \cdot \gamma}{(1 + \gamma) - (1 - \gamma) \cdot \cos \varphi}$ $\beta = \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma \cdot \left(\frac{1 + \cos \varphi}{1 - \cos \varphi} \right)}$

<p>5. Коаксиальные цилиндры с дном</p>  <p>D и d – больший и меньший диаметры коаксиальной структуры.</p>	$\sigma = \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{1}{(1-\sqrt{\gamma})} + \frac{1}{(1+\sqrt{\gamma})} \cdot C \cdot \exp\left\{ \frac{4\sqrt{\gamma} \cdot L}{(D-d)} \right\} \right)}{C \cdot \exp\left\{ \frac{4\sqrt{\gamma} \cdot L}{(D-d)} \right\} - 1};$ $C = \frac{(\sqrt{\gamma} - \gamma + 2) \cdot (1 + \sqrt{\gamma})}{(\sqrt{\gamma} + \gamma - 2) \cdot (1 - \sqrt{\gamma})};$
<p>6. Поверхность с поперечным сечением в виде равнобедренного треугольника (с дном)</p> 	$\sigma = \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{1}{(1-\sqrt{\gamma})} + \frac{1}{(1+\sqrt{\gamma})} \cdot C \cdot \exp\left\{ \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot L}{a} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sin \varphi} \right] \right\} \right)}{C \cdot \exp\left\{ \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot L}{a} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sin \varphi} \right] \right\} - 1};$ <p>Где C – смотри (5). {Обозначения типа (5) следует понимать следующим образом: структура 5 из таблицы.}</p>
<p>7. Поверхность с поперечным сечением в виде четырехугольника (с дном)</p> 	$\sigma = \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{1}{(1-\sqrt{\gamma})} + \frac{1}{(1+\sqrt{\gamma})} \cdot C \cdot \exp\left\{ 4\sqrt{\gamma} \cdot L \cdot \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right] \right\} \right)}{C \cdot \exp\left\{ 4\sqrt{\gamma} \cdot L \cdot \left[\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right] \right\} - 1};$ <p>Где C – смотри (5)</p>

<p>8. Поверхность с поперечным сечением в виде правильного многоугольника (с дном)</p> 	$\sigma = \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot \left(\frac{1}{(1-\sqrt{\gamma})} + \frac{1}{(1+\sqrt{\gamma})} \cdot C \cdot \exp\left\{ \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot L}{R \cdot \cos(\varphi/2)} \right\} \right)}{C \cdot \exp\left\{ \frac{2\sqrt{\gamma} \cdot L}{R \cdot \cos(\varphi/2)} \right\} - 1};$ <p>R – радиус описанной окружности,</p> <p>Где C – смотри (5).</p>
<p>9. Глухой цилиндр с диафрагмой на входе</p> 	$\sigma = \frac{\sigma_2 + \beta_2 \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)}{1 - \beta_2 \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)}.$ <p>Расшифровка обозначений типа σ_2 – была дана выше.</p>
<p>10. Глухой цилиндр с отражателем на входе</p> 	$\sigma = \frac{\sigma_2 + \beta_2 \cdot \gamma \cdot \frac{d^2}{D^2}}{1 - \beta_2 \cdot (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2}{D^2}}.$
<p>11. Сквозная сфера</p> 	$\sigma = \frac{1 - 2 \cdot A}{1 - A} \cdot \frac{\gamma}{1 - (1 - (1 - \gamma) \cdot (1 - 2 \cdot A))};$ $\beta = \frac{1 - 2 \cdot A}{1 - A} \cdot \frac{A(1 - \gamma)}{(1 - (1 - \gamma) \cdot (1 - 2 \cdot A))};$ $A = \frac{1 - \cos \varphi}{2}.$ <p>При $\varphi = \varphi'$.</p>

<p>12. Сквозной конус</p> 	$\sigma = \sigma_1 - \text{из (3)}$ $\beta = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4 \cdot f^2}}{2 \cdot f}, \text{ где } c = \frac{\gamma}{1 - \gamma} + \frac{2 \cdot k^2 + 1}{8 \cdot (k^2 + 1)}, \text{ а}$ $f = -\frac{k^2}{2}. \text{ Здесь } k \text{ и } k^2 - \text{из (3)}$
<p>13. Сквозной цилиндр с диафрагмой на входе</p> 	$\sigma = \frac{\sigma_1 + \beta_1 \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{1 - \beta_1 \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}$ $\beta = \frac{\beta_1 \cdot \frac{d^2}{D^2}}{1 - \beta_1 \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}$
<p>14. Сквозной цилиндр с отражателем на входе</p> 	$\sigma = \frac{\sigma_1 + \beta_1 \cdot \gamma \cdot \frac{d^2}{D^2}}{1 - \beta_1 \cdot (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2}{D^2}}$ $\beta = \frac{\beta_1 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{1 - \beta_1 \cdot (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2}{D^2}}$
<p>15. Глухой конус с отражателем на входе</p> 	$\sigma = \frac{\sigma_3 + \beta_3 \cdot \gamma \cdot \frac{d^2}{D^2}}{1 - \beta_3 \cdot (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2}{D^2}}$
<p>16. Глухой конус с диафрагмой на входе.</p> 	$\sigma = \frac{\sigma_3 + \beta_3 \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{1 - \beta_3 \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}$

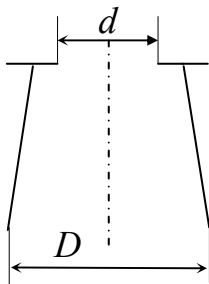
17. Сквозной конус с отражателем на входе.



$$\sigma = \frac{\sigma_{12} + \beta_{12} \cdot \gamma \cdot \frac{d^2}{D^2}}{1 - \beta_{12} \cdot (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2}{D^2}}$$

$$\beta = \frac{\beta_{12} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{1 - \beta_{12} \cdot (1 - \gamma) \cdot \frac{d^2}{D^2}}$$

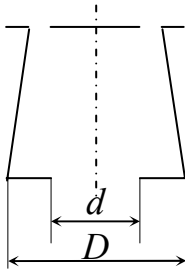
18. Сквозной конус с диафрагмой на входе.



$$\sigma = \frac{\sigma_{12} + \beta_{12} \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}{1 - \beta_{12} \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}$$

$$\beta = \frac{\beta_{12} \cdot \frac{d^2}{D^2}}{1 - \beta_{12} \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}$$

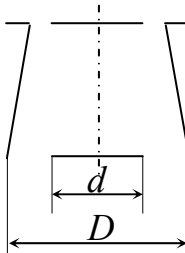
19. Конус с отражателем на входе и диафрагмой на выходе.



$$\sigma = \sigma_{15} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \sigma_{17} \cdot \frac{d^2}{D^2}$$

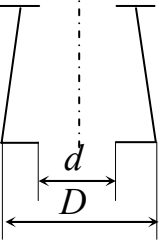
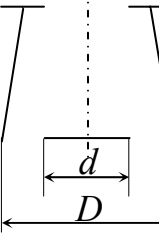
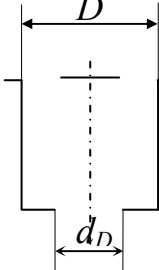
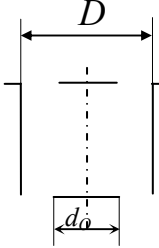
$$\beta = \beta_{15} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \beta_{17} \cdot \frac{d^2}{D^2}$$

20. Конус с отражателем на входе и отражателем на выходе.

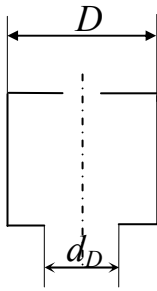


$$\sigma = \sigma_{17} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \sigma_{15} \cdot \frac{d^2}{D^2}$$

$$\beta = \beta_{17} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \beta_{15} \cdot \frac{d^2}{D^2}$$

<p>21. Конус с диафрагмой на входе и диафрагмой на выходе.</p> 	$\sigma = \sigma_{16} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \sigma_{18} \cdot \frac{d^2}{D^2}$ $\beta = \beta_{16} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \beta_{18} \cdot \frac{d^2}{D^2}$
<p>22. Конус с диафрагмой на входе и отражателем на выходе.</p> 	$\sigma = \sigma_{18} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \sigma_{16} \cdot \frac{d^2}{D^2}$ $\beta = \beta_{18} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + \beta_{16} \cdot \frac{d^2}{D^2}$
<p>23. Цилиндр с отражателем на входе и диафрагмой на выходе.</p> 	$\sigma = \sigma_{10} \cdot \left(1 - \frac{d_n^2}{D^2}\right) + \sigma_{14} \cdot \frac{d_n^2}{D^2}$ $\beta = \beta_{10} \cdot \left(1 - \frac{d_n^2}{D^2}\right) + \beta_{14} \cdot \frac{d_n^2}{D^2}$
<p>24. Цилиндр с отражателем на входе и отражателем на выходе.</p> 	$\sigma = \sigma_{14} \cdot \left(1 - \frac{d_o^2}{D^2}\right) + \sigma_{10} \cdot \frac{d_o^2}{D^2}$ $\beta = \beta_{14} \cdot \left(1 - \frac{d_o^2}{D^2}\right) + \beta_{10} \cdot \frac{d_o^2}{D^2}$

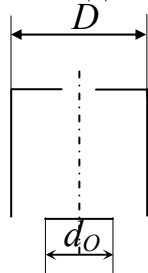
25. Цилиндр с диафрагмой на входе и диафрагмой на выходе.



$$\sigma = \sigma_9 \cdot \left(1 - \frac{d_D^2}{D^2}\right) + \sigma_{13} \cdot \frac{d_D^2}{D^2}$$

$$\beta = \beta_9 \cdot \left(1 - \frac{d_D^2}{D^2}\right) + \beta_{13} \cdot \frac{d_D^2}{D^2}$$

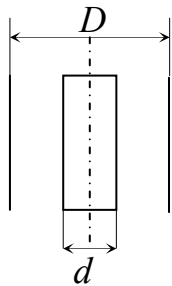
26. Цилиндр с диафрагмой на входе и отражателем на выходе.



$$\sigma = \sigma_{13} \cdot \left(1 - \frac{d_o^2}{D^2}\right) + \sigma_9 \cdot \frac{d_o^2}{D^2}$$

$$\beta = \beta_{13} \cdot \left(1 - \frac{d_o^2}{D^2}\right) + \beta_9 \cdot \frac{d_o^2}{D^2}$$

27. Сквозные коаксиальные цилиндры



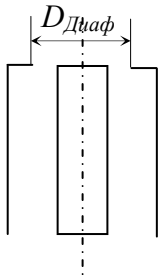
$$\sigma = \sigma_l,$$

Здесь вместо параметра D , подставляем:

$$D_{\text{экв}} = D - d.$$

(Ниже, приведенные обозначения размеров, аналогичны).

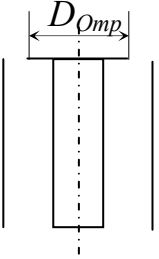
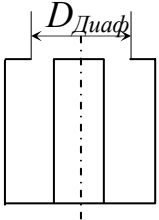
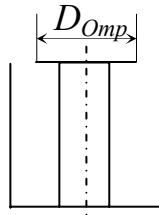
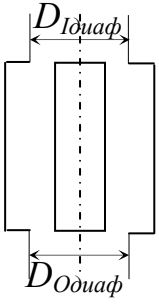
28. Сквозные коаксиальные цилиндры с диафрагмой на входе



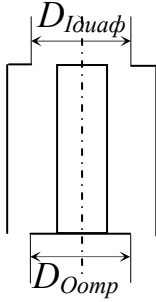
$$\sigma = \sigma_{13},$$

Здесь вместо параметра D , подставляем:

$$D_{\text{экв}} = D - d, \text{ а вместо } d: d_{\text{экв}} = D_{\text{Диаф}} - d.$$

<p>29. Сквозные коаксиальные цилиндры с отражателем на входе</p> 	$\sigma = \sigma_{14},$ <p>Здесь вместо параметра D, подставляем: $D_{\text{экв}} = D - d$, а вместо d: $d_{\text{экв}} = D_{\text{отр}} - d$.</p>
<p>30. Глухие коаксиальные цилиндры с диафрагмой на входе</p> 	$\sigma = \sigma_9,$ <p>Здесь вместо параметра D, подставляем: $D_{\text{экв}} = D - d$, а вместо d: $d_{\text{экв}} = D_{\text{диаф}} - d$.</p>
<p>31. Глухие коаксиальные цилиндры с отражателем на входе</p> 	$\sigma = \sigma_{10},$ <p>Здесь вместо параметра D, подставляем: $D_{\text{экв}} = D - d$, а вместо d: $d_{\text{экв}} = D_{\text{отр}} - d$.</p>
<p>32. Коаксиальные цилиндры с диафрагмой на входе и на выходе</p> 	$\sigma = \sigma_{25},$ <p>Здесь вместо параметра D, подставляем: $D_{\text{экв}} = D - d$, а вместо d: $d_{\text{экв}} = D_{\text{идиаф}} - d$, Вместо d_D: $d_{D_{\text{экв}}} = D_{\text{одиаф}} - d$</p>

33. Коаксиальные цилиндры с диафрагмой на входе и отражателем на выходе



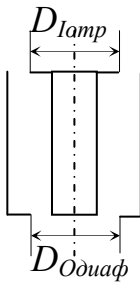
$$\sigma = \sigma_{26},$$

Здесь вместо параметра D , подставляем:

$$D_{\text{экв}} = D - d, \text{ а вместо } d: d_{\text{экв}} = D_{I\text{диаф}} - d,$$

$$\text{Вместо } d_O: d_{O\text{экв}} = D_{O\text{отр}} - d$$

34. Коаксиальные цилиндры с отражателем на входе и диафрагмой на выходе



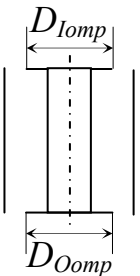
$$\sigma = \sigma_{27},$$

Здесь вместо параметра D , подставляем:

$$D_{\text{экв}} = D - d, \text{ а вместо } d: d_{\text{экв}} = D_{I\text{отр}} - d,$$

$$\text{Вместо } d_D: d_{D\text{экв}} = D_{O\text{диаф}} - d$$

35. Коаксиальные цилиндры с отражателем на входе и на выходе



$$\sigma = \sigma_{24},$$

Здесь вместо параметра D , подставляем:

$$D_{\text{экв}} = D - d, \text{ а вместо } d: d_{\text{экв}} = D_{I\text{отр}} - d,$$

$$\text{Вместо } d_O: d_{O\text{экв}} = D_{O\text{отр}} - d$$

На рис. 8 – 11 представлены результаты расчета по вышеприведенным соотношениям для некоторых структур.

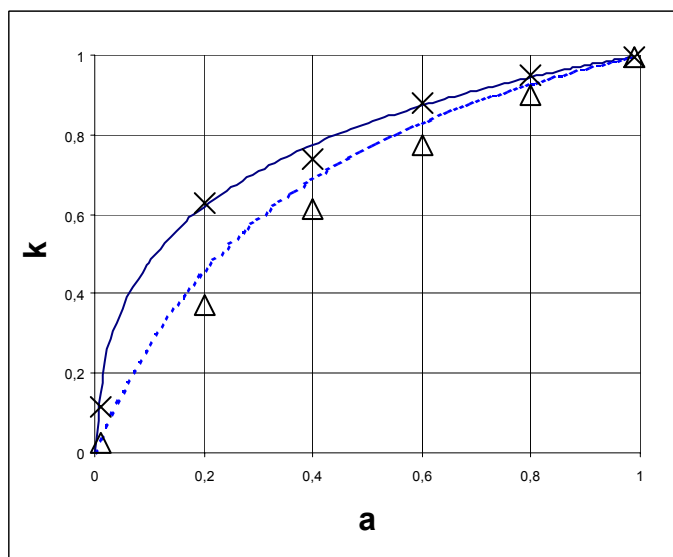


Рис. 8. Зависимость коэффициента захвата структуры (k), состоящей из цилиндра и конуса от коэффициента прилипания (a); (— $D1/L1$; $D1/d2/L2 = 0,05/0,2$; $0,05/0/0,02$ - 1; — $0,2/0,1$; $0,2/0/0,1$ - 2; x- - Монте-Карло - 1; Δ - Монте-Карло - 2).

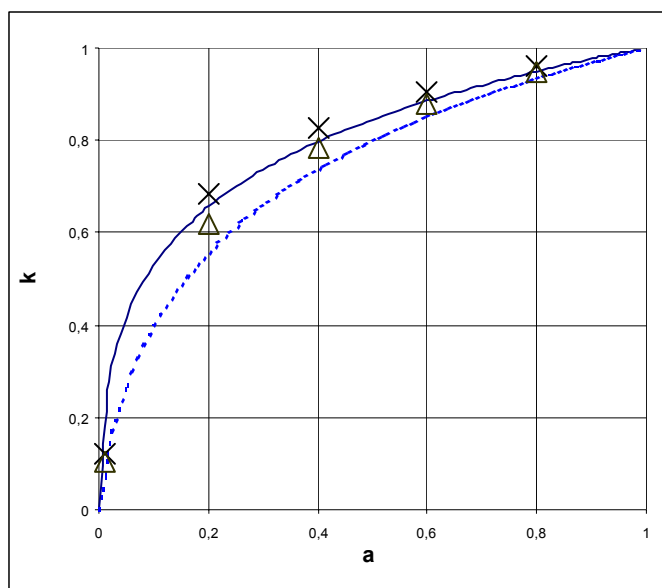


Рис. 9. Зависимость коэффициента захвата (k) глухого конуса от коэффициента прилипания (a); (— $Vx/Vyx/Dл = 0,1/0,15/0,5$ - 1; — $0,1/0,05/0,3$ - 2; x- - Монте-Карло - 1; Δ - Монте-Карло - 2).

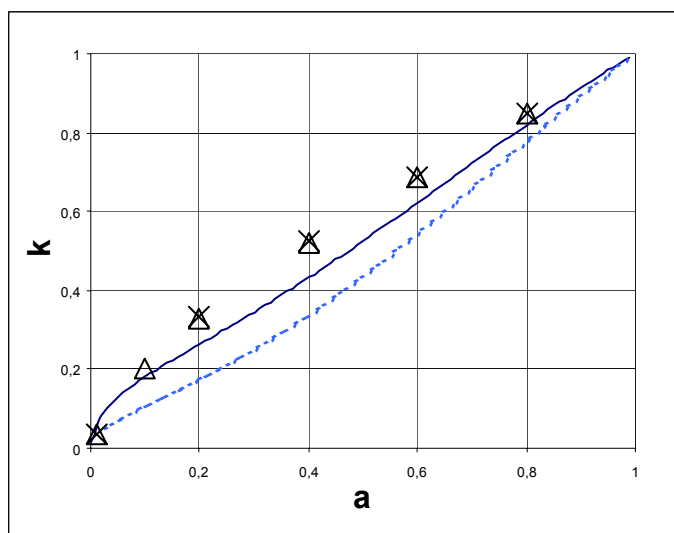


Рис. 10. Зависимость коэффициента захвата конуса с диафрагмой на входе и на выходе (k) от коэффициента прилипания (a); (— - $V_x/V_{yx}/V_{x1}/V_{y1}/D_l = 0,1/0,15/0,05/0,07/0,5$ - 1; — $0,1/0,05/0,05/0,02/0,5$ - 2; x - Монте-Карло - 1; Δ - Монте-Карло - 2).

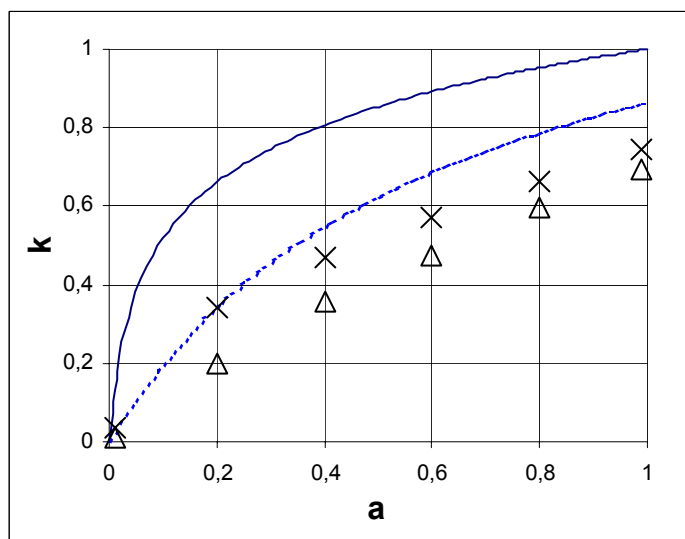


Рис. 11. Зависимость коэффициента захвата коаксиальных цилиндров с отражателем на входе и диафрагмой на выходе (k) от коэффициента прилипания (a); (— - $D/d/d_1/d_2/L = 0,2/0,1/0,14/0,15/0,7$ - 1; — $0,2/0,1/0,14/0,15/0,1$ - 2; x - Монте-Карло - 1; Δ - Монте-Карло - 2).

Из представленных выше рисунков видно, что погрешность метода, по сравнению с методом Монте-Карло, увеличивается по мере усложнения структуры. Это объясняется тем, что соотношения для более сложных структур, например для коаксиальных цилиндров, изначально выводились с погрешностью (Считался коэффициент захвата для цилиндра, с эквивалентным диаметром, равным разности диаметров структуры из коаксиальных цилиндров и т.п.). Кроме того, сказывается зависимость от геометрических размеров структуры.

Для сопряжения различных поверхностей, с различными коэффициентами захвата применяются следующие формулы:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_1 + \alpha_1 \cdot \frac{\beta_2 \cdot \sigma_1 + \sigma_2}{1 - \beta_1 \cdot \beta_2}; \\ \beta &= \beta_1 + \frac{\alpha_1^2 \cdot \beta_2}{1 - \beta_1 \cdot \beta_2}; \\ \alpha &= \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{1 - \alpha_1 \cdot \alpha_2}.\end{aligned}\quad (3).$$

Формулы (3) были предложены соответственно в [2], [7], [8]. Проверку их пригодности целесообразно осуществить следующим образом. Сначала определяется коэффициент захвата какой-либо структуры, затем она разбивается на несколько частей, и рассчитывается коэффициент захвата получившейся структуры, при этом используются формулы (3). Результаты такого расчета для цилиндрической структуры с дном приведены на рис. 12. Как видно из графиков, данные достаточно хорошо совпадают.

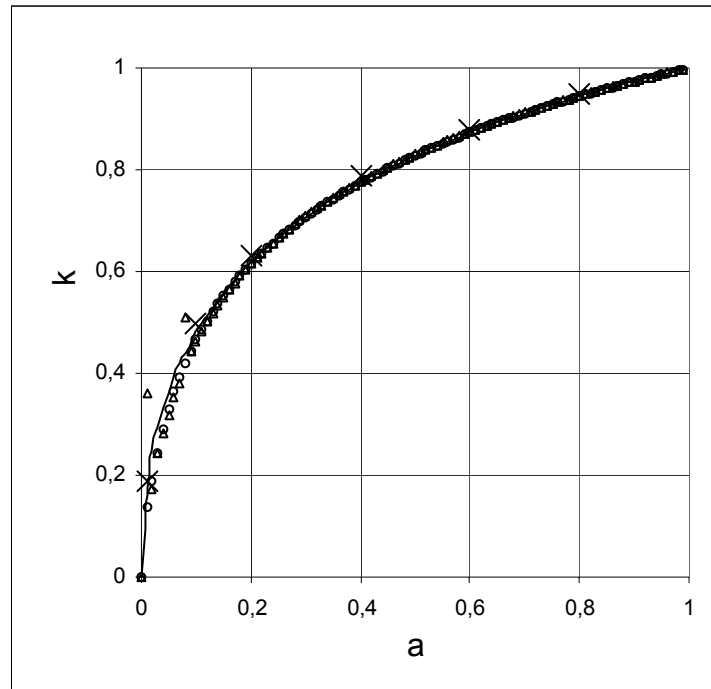


Рис. 12. Зависимость коэффициента захвата глухого цилиндра (k) от коэффициента прилипания (a), в зависимости от количества частей разбиения ($L=1$ метр, $D=0,1$ метр; — - без разбиения, \circ - пять частей разбиения, Δ —десять частей разбиения).

Там же приведены результаты расчета методом Монте-Карло.

3. РАСЧЕТ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДЛОЖЕННОГО АЛГОРИТМА КОЭФФИЦИЕНТА ЗАХВАТА КРИОНАСОСА MARATHON-8.

В настоящее время для расчета сложных криовакуумных систем используются модели, основывающиеся на применении достаточно сложного математического аппарата (метод пробной частицы Монте-Карло, метод угловых коэффициентов [1] и др.). На начальном этапе

В результате выполнения данной работы был разработан универсальный алгоритм, рассчитывающий с помощью приведенных выше соотношений, коэффициент захвата поглощающей структуры. Далее, этот алгоритм будет описан на примере насоса Marathon-8 (рис.13).

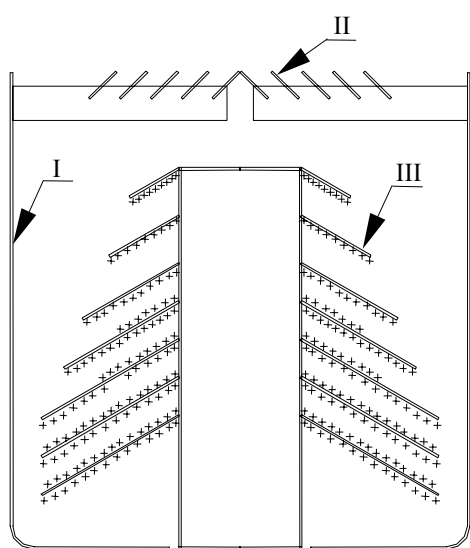


Рис. 13. Схема крионасоса MARATHON-8 I – цилиндрический кожух, II – жалюзийный экран, III – «елочка», + - сорбент).

от плоскостей производится следующим образом: для всей поверхности крионасоса вычисляется средний коэффициент прилипания, равный сумме коэффициентов прилипания каждой из поверхностей крионасоса (в том числе и кожуха), причем каждое слагаемое умножается на соответствующий весовой коэффициент, определяемый из отношения площади данной поверхности, к площади всей структуры.

Задаем количество поверхностей равным 8. В соответствии с табл.1., это будут следующие поверхности: 24, 35, 35, 35, 35, 35, 35, и 31. Процесс задавания поверхностей – важный этап, так как очевидно, что чем лучше поверхность приближена к реальной, тем точнее будут результаты расчета. На (рис.15) представлены результаты расчета насоса. Как видно из графиков, расхождения могут быть довольно большими. Однако характер зависимости сохраняется. Возможных причин расхождения может быть несколько:

Первая заключается в достаточно грубой замене поверхностей насоса, которые являются конусами, на плоскости.

1. Сначала требуется разбить структуру на составные части, которые соответствовали вышеприведенным структурам.

2. После этого необходимо определить геометрические характеристики каждого из элементов системы, а также соответствующие коэффициенты прилипания.

Ниже предложен один из возможных вариантов моделирования сложной структуры с помощью стандартных поверхностей.

Структуру, представленную на (рис.13), целесообразно разбить следующим образом (рис.14). Из рисунка 14 видно, что конические сорбирующие поверхности заменены плоскостями. Расстояние между плоскостями выбираются по среднему, между местом крепления соответствующего конуса к цилиндру (см. рис. 13) и нижней его точкой. Учет отличия площадей конусов

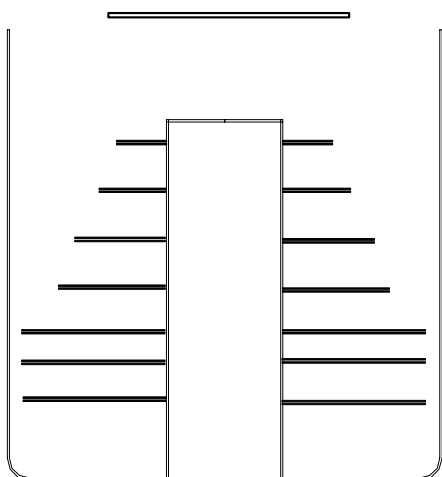


Рис. 14. Упрощение конструкции крионасоса.

Вторая в том, что коэффициент прилипания осреднялся по поверхности насоса, т.е. принималось, что он постоянен во всех сечениях насоса

Третья в том, формулы для коаксиальных цилиндров были получены путем замены диаметров в формулах для цилиндрических структур эквивалентными.

Кроме того, при предложенном разбиении ширина поверхностей оказалась больше их длины, а это несомненно вносит определенную погрешность в конечный результат.

Все эти факторы отрицательно сказываются на результатах расчета. Для примера, на рис. 15 представлены расчеты методом Монте-Карло структуры на рис.14. Из графиков видно, что значения коэффициента захвата, рассчитанные по аналитическим соотношениям для структуры на рис. 14 находятся между значениями полученными методом пробной частицы Монте-Карло для структур на рис.13 и рис.14.

Таким образом, используя предложенный алгоритм, можно рассчитывать коэффициенты захвата для осесимметричных вакуумных структур с помощью аналитических соотношений.

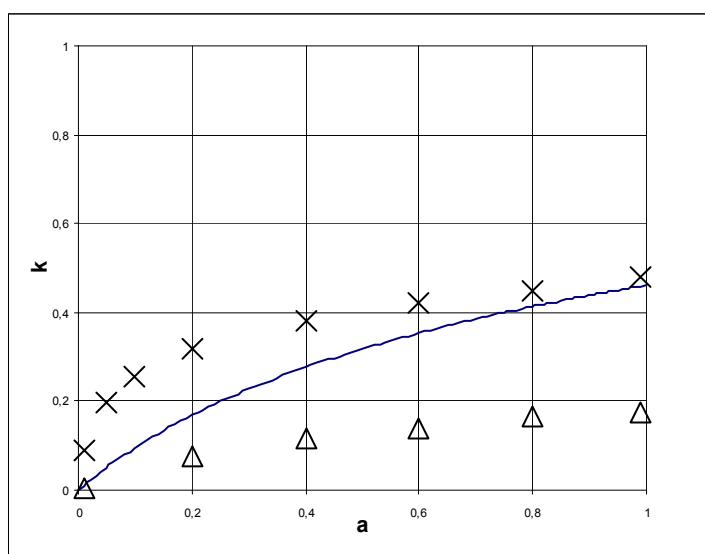


Рис.15. Зависимость коэффициента захвата насоса MARATHON-8 (k) от коэффициента прилипания (a), (— - расчеты аналитическим методом, x - Монте-Карло - 1, Δ - Монте-Карло - 2).

Погрешностью при расчете достаточно сложных структур можно пренебречь, так как соотношения применяются только для предварительных расчетов. Соотношения можно использовать и в некоторых других случаях, например при получении сравнительных характеристик различных систем, это объясняется тем, что несмотря на расчетную погрешность характер зависимости сохраняется (рис. 8-11). Ограничения на использование данных соотношений для более точных рас-

четов накладываются принятые допущения (см. Введение), а так же погрешность получения самих соотношений.

4. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.

[1]. Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Андросов А.В., Расчет сложных вакуумных систем, Москва, МЭИ, 2001г., 180 с.

[2]. Быков Д.В., Методика расчета осесимметричных геттерных структур, Электронное машиностроение, робототехника и технология ЭВП, Москва МИЭМ, 1986, стр. 8-12.

[3]. Nesterov S., Vassiliev Yu., R. C. Longsworth, Affect on pumping-speed measurements due to variations of test dome design based on Monte-Carlo analysis. Journal of Vacuum Science and Technology, 2001, Jun/Jul.

[4]. Быков Д.В., Анализ эффективности геттерных структур, Электронное машиностроение, робототехника и технология ЭВП, Москва, МИЭМ, 1984, стр. 142-149.

[5]. Гоникберг С.И., Коэффициент поглощения высоковакуумных сорбционных насосов, Электронная техника – Сер. 1, 1968, №9, стр. 129-138.

[6]. Саксаганский Г.Л., Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах, Москва, Атомиздат, 1980, 216 стр.

[7]. Helmer J.C., Applications of an approximation to molecular flow in cylindrical tubes, J. Vac. Sci. and Technol., 1967, V4, p. 360-363.

[8]. Oatley C. W., The flow of gas through composite system at very low pressure, Brit. J. Appl. Phys., 1957, V8, p. 15-18.

4. СОДЕРЖАНИЕ.

1. Введение.....	2
2. Аналитические соотношения.....	7
3. Расчет с помощью предложенного алгоритма коэффициента захвата крионасоса marathon-8.....	20
4. Рекомендуемая литература.....	22
4. Содержание.....	22