

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ
Всесоюзного симпозиума
«Состояние и перспективы разработки
и производства новых видов
вакуумного оборудования»

Выпуск 1



МИНИСТЕРСТВО ХИМИЧЕСКОГО И НЕФТЯНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

Всесоюзного симпозиума "Состояние и перспективы
разработки и производства новых видов
вакуумного оборудования"

(г.Казань, апрель 1981 г.)

Центральный институт научно-технической информации и
технико-экономических исследований по химическому и
нефтяному машиностроению

Москва 1980 г.

ВЫБОР ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ДИФфуЗИОННОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ЗАЗОРЕ

И.С.Житомирский, Г.И.Воробьева

УДК 621.52

338.45

В сборнике опубликованы тезисы докладов Всесоюзного симпозиума "Состояние и перспективы разработки и производства новых видов вакуумного оборудования", организованного ПО "Вакууммаш", Центральным и Татарским областными правлениями НТО Машпром, Казанским Государственным университетом им.В.И.Ульянова-Ленина, Казанским химико-технологическим институтом им.С.М.Кирова и ЦИНТИхимнефтемашем.

Задача свободномолекулярного переноса в длинных каналах возникает при нахождении распределения молекулярных потоков в вакуумированных зазорах криостатов, а также в откачных трактах вакуумных систем.

Рассматривается свободномолекулярный стационарный поток в канале, представляющем собой зазор между двумя плоскими стенками. Область S на плоскости ограничена контуром L , h - расстояние между стенками, d - характерный размер области S . Делается предположение о диффузном характере эмиссии и отражения молекул на стенках. Поглощение отсутствует. На боковую поверхность зазора, т.е. цилиндрическую поверхность с направляющей L и образующими, перпендикулярными стенкам, падает извне поток плотностью Q . Предполагается, что он имеет диффузный характер и однороден по высоте зазора.

Для свободномолекулярного потока частиц в плоскопараллельном зазоре плотности эффективных потоков $q_j(\bar{y})$ удовлетворяют системе интегральных уравнений*. Индекс j принимает значения 1 и 2 и означает номер стенки. С помощью замены неизвестных функций $u_1 = q_1 + q_2$ и $u_2 = -q_1 + q_2$ эта система расщепляется на два независимых интегральных уравнения

$$u_1(\bar{y}) = \int_S K(\bar{y}, \bar{y}') u_1(\bar{y}') dS_{y'} + 2 \int_L K_0(\bar{y}, \bar{y}') Q(\bar{y}') dL_{y'} + u_1^*, \quad (1)$$

$$u_2(\bar{y}) = - \int_S K(\bar{y}, \bar{y}') u_2(\bar{y}') dS_{y'} + u_2^*, \quad (2)$$

$$\text{где} \quad u_1^* = q_1^* + q_2^*; \quad u_2^* = -q_1^* + q_2^*;$$

$$K(\bar{y}, \bar{y}') = h^2 / \pi [h^2 + (\bar{y} - \bar{y}')^2]^{-2};$$

$$K_0(\bar{y}, \bar{y}') = h^2 (\bar{n}, \bar{y}' - \bar{y}) / 2\pi [h^2 + (\bar{y} - \bar{y}')^2]^{-2} (\bar{y} - \bar{y}')^{-2};$$

\bar{n} - от внешней нормали к контуру L в точке \bar{y} ;
 $q_j^*(\bar{y})$ - плотности потока частиц, эмитируемых в точке \bar{y} .

* Р.Зигель, Дж.Хауэлл. Теплообмен излучением. - М.: Мир, 1975.

В случае малого зазора ($h \ll d$) ядро $K(\bar{y}, \bar{y}')$ становится почти δ -образным и получение численного решения с приемлемой точностью затруднительно. Однако локальный характер интегрального оператора при $h \ll d$ позволяет эту задачу заменить более простой, допускающей в ряде случаев аналитическое решение.

При указанных условиях интегральные уравнения относительно $u_1(\bar{y})$ и $u_2(\bar{y})$ можно приближенно заменить системой дифференциальных уравнений

$$hD\Delta u_1 = -u_1^*; \quad (3)$$

$$hD\Delta u_2 + 2u_2 = u_2^*, \quad (4)$$

где Δ - двумерный оператор Лапласа;

$D \approx \frac{h}{2} \ln \frac{d}{h}$ - величина, слабо зависящая от положения точки.

Рассмотрен случай, когда S представляет собой бесконечную полосу, ограниченную двумя прямыми, параллельными оси OY . Ширина полосы равна l . Предполагается, что плотность эффективного потока постоянна по всей длине полосы, т.е. не зависит от координаты y .

Решения уравнений (3) и (4) качественно отличаются друг от друга. Наилучшим приближением к решению соответствующего интегрального уравнения на достаточном расстоянии от контура L является решение дифференциального уравнения (4) $u_2^0 = u_2^*/2$.

Для уравнения (3) задача нахождения приближенного значения сводится к решению уравнения Пуассона в области S . Для случая бесконечной полосы уравнение (3) принимает вид

$$hD \frac{d^2 u_1}{dx^2} = -u_1^*. \quad (5)$$

Возникает задача корректного выбора граничных условий.

В настоящей работе рассмотрено несколько возможных вариантов такого выбора. Анализ решения интегрального уравнения (1) показывает, что при отсутствии газовой выделения ($u_1^* = 0$) с приближением к границе на расстояние порядка h производная $\frac{du_1}{dx}$ возрастает и при $h \rightarrow 0$ $\frac{du_1}{dx}(0) \rightarrow 2 \frac{du_1}{dx}(l/2)$. Таким образом, для нахождения линейной функции, являющейся общим решением уравнения (5) при $u_1^* = 0$ и приближением к решению $u_1(x)$ интегрального уравнения (1) внутри области, нужно знать поведение функции u_1 не на самой границе, а на некотором

удалении от нее.

1. Граничное условие, полученное из интегрального уравнения для бесконечной полосы разложением плотности эффективного потока в ряд Тейлора в окрестности точки, находящейся на расстоянии γh (γ порядка 1) от границы области.

2. Условие другого типа может быть получено в частном случае при отсутствии газовой выделения ($u_1^* = 0$). При этом проекция плотности потока массы F_x в зазоре постоянна и не зависит от координаты x .

Общее решение дифференциального уравнения (5) имеет вид

$$u_1(x) = -\frac{u_1^*}{2hD} x^2 + cx + b.$$

Коэффициенты c и b найдены для обоих видов граничных условий и проведено сравнение соответствующих решений дифференциального уравнения (5) с численным решением интегрального уравнения (1).

Результаты сравнения показали, что наилучшее приближение к численному решению, полученному при отсутствии газовой выделения, дает аналитическое решение с граничным условием второго типа при $\gamma = 1$. Граничное условие первого типа, применимое и при наличии газовой выделения, требует увеличения γ при уменьшении параметра h . Значение $\gamma = 1$ дает удовлетворительное приближение при $0,05 < h < 0,2$.

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ СИСТЕМЫ ПЛОСКИХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ ЭКРАНОВ

В.В.Кейс, А.М.Кислов

Рассматривается молекулярный перенос в системе бесконечных параллельных плоскостей с перфорацией, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга и имеющих одинаковый коэффициент перфорации ξ . Предполагается, что отверстия в экранах расположены регулярно и в соседних экранах сдвинуты на t - половину шага перфорации. При этом система экранов может рассматриваться как множество периодически повторяющихся (по всем трем осям) элементарных ячеек. Характер и параметры молекулярного переноса в ячейке будут такими же, как и во всем бесконечном слое, если боковые грани ячейки считать зеркально отражающими плоскостями.

Такая система экранов является моделью многослойной

вакуумной изоляции. Теплопроводность этой изоляции существенно зависит от уровня вакуума в межэкранных зазорах, который определяется молекулярной проводимостью (пропускной способностью) пакета при его поперечной откачке.

В настоящей работе методом Монте-Карло вычисляется вероятность p_0 прохождения молекул через один слой системы экранов при различных соотношениях между d , $2t$ и h ; $h = (\bar{p} - 1)^{-1}$ (\bar{p} - плотность укладки пакета).

Полная вероятность P для пакета из N экранов определяется приближенно по формуле для системы одинаковых элементов

$$P = \frac{P_0}{1 + (1 - P_0)(N - 2)}.$$

Удельная проводимость пакета экранов $U = \xi p U_0$ (U_0 - теоретическая удельная проводимость отверстия). Метод Монте-Карло позволяет проводить расчет вероятности p_0 (или вероятности p при небольшом числе экранов) с учетом реальных геометрических и физических параметров системы и законов взаимодействия молекулярного потока со стенками зазоров.

Получены результаты расчета вероятности и проводимости для пакетов с $\xi = 1,57\%$; $3,14\%$; $6,28\%$ при различных значениях d , $2t$, h , соответствующих плотностям укладки $\bar{p} = 12$; 18 ; ...; 48 см^{-1} . Величина p_0 возрастает (падает) с уменьшением (увеличением) коэффициента перфорации ξ при изменяющемся d и $2t = \text{const}$ (или пропорциональном изменении d и $2t$). Проводимость $U \approx \xi p$ изменяется при этом в соответствии с характером изменения ξ .

Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными для одного типа изоляции при $\bar{p} = \text{const}$ и переменном числе экранов N , а также при постоянной толщине пакета и переменном \bar{p} .

КИНЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ МОДЕЛЬНОЕ ПОРИСТОЕ ТЕЛО

В.В. Левданский, В.Г. Лейпина, Н.В. Павлюкевич

Кинетическое описание системы пористое тело-газ как единого целого позволяет учесть характеристики пористого тела (пористость, размер частиц) наряду с газодинамической длиной свободного пробега, а также описать процесс переноса

во всем диапазоне чисел Кнудсена.

Использовали модель пылевого газа, согласно которой система пористое тело-газ моделируется смесью двух газов. При этом молекулы одного из компонентов, соответствующего остову тела, имеют размеры и массу, значительно превосходящие размеры и массу реальных молекул газа (второго компонента) и представляют собой совокупность распределенных в пространстве неподвижных крупных сферических частиц. Подход к кинетическому описанию системы, используемый в настоящей работе, характеризуется учетом сопротивления частиц по аналогии с течением газа в силовом поле, т.е. газ полагается движущимся в поле сил сопротивления.

Рассматривали медленное изотермическое движение пара через сухой пористый слой толщиной L , ограниченный с одной стороны поверхностью испаряющейся жидкости (или поверхность, на которой конденсируется пар), с другой - ее паром, давление которого p_L при $x = L$ задано. Течение предполагалось медленным вследствие малости значения $|\gamma|$; $\gamma = (p_L - p_e)/p_e$, где p_e - давление насыщенного пара при температуре T .

Найдено выражение для безразмерной скорости пара C на выходе из пористого слоя как функции безразмерных параметров γ , $\frac{L}{R}$, Kn , Π (R - радиус неподвижных сфер, Kn - число Кнудсена, Π - пористость).

Следует отметить, что при $Kn \rightarrow \infty$ значения C , вычисляемые по найденному выражению, достаточно близки к соответствующим значениям, определяемым из выражения, полученного при учете только диффузионного переноса в пористой среде. Однако с уменьшением Kn различие между значениями C , соответствующими этим выражениям, существенно возрастает.

О ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ МОЛЕКУЛ ПРИМЕСНОГО ГАЗА

В.В. Левданский

В химической технологии широко используется метод получения конденсированных слоев веществ путем осаждения из газовой фазы. Многие физико-химические свойства конденсата сильно зависят от его состава. Даже малое количество примеси может резко изменить эти свойства. При этом возникают как

вопросы чистоты получаемого конденсата, поскольку в осаждаемом газе всегда есть молекулы нежелательной примеси, которые могут захватываться конденсатом, так и вопросы управления составом конденсата при получении слоев конденсата сложного состава (например, в технологии различного рода волноводов).

С другой стороны, часто требуется удалить примесь именно из газовой фазы, например, при криогенной откачке. Сделать это можно путем осаждения легкоконденсирующегося газа, конденсат которого захватывает примесные молекулы.

При определении концентрации компонентов в образующемся конденсате часто используются либо соотношения, справедливые только для условий равновесия (когда число испаряющихся молекул равно числу конденсирующихся), либо другой предельный случай, когда вообще не учитывается испарение молекул примесного компонента из конденсата. Реальные условия конденсации могут находиться между этими предельными случаями.

Все изложенное выше приводит к необходимости исследования процесса осаждения вещества из газовой смеси на основании молекулярно-кинетического подхода. Далее для простоты будем рассматривать бинарную газовую смесь, причем полагаем, что концентрация одного компонента намного больше концентрации второго компонента как в газовой, так и в конденсированной фазе.

В этом случае процессы осаждения в квазизамкнутом объеме можно описать следующей системой балансных уравнений (режим течения газа, натекающего в объем, считаем свободно-молекулярным, а функцию распределения молекул, падающих на конденсат, максвелловской)

$$V \frac{dn_{g1}}{dt} = b_1 (\sqrt{T'_g} n'_{g1} - \sqrt{T_g} n_{g1}) + \left[I_1 - \alpha_1 n_{g1} \left(\frac{kT_g}{2\pi m_1} \right)^{1/2} \right] S, \quad (1)$$

$$V \frac{dn_{g2}}{dt} = b_2 (\sqrt{T'_g} n'_{g2} - \sqrt{T_g} n_{g2}) - \beta n_{g2} \left(\frac{kT_g}{2\pi m_2} \right)^{1/2} S, \quad (2)$$

где S - площадь поверхности фазового перехода; n_{gi} , n'_{gi} - плотность молекул компонента i в газовой фазе в объеме V и вне его; b_i - коэффициенты, характеризующие пропускную способность канала, соединяющего объем с внешней средой, по отношению к компоненту i ; T_g , T'_g - температуры газа в объеме и вне его; m_i - масса молекулы компонента i ; k - постоянная Больцмана; α_i - коэффициент прилипания молекул газа

компонента i , характеризующий вероятность того, что молекула газа при столкновении с поверхностью не отразится упруго обратно в газовую фазу; β - коэффициент захвата молекул примесного компонента, определяемый как отношение результирующего потока молекул примесного компонента в конденсат к падающему потоку молекул примеси ($\beta \leq \alpha_2$).

Величина I_i имеет вид

$$I_i = n_i \left(\frac{kT}{2\pi m_i} \right)^{1/2} \exp \left\{ -\frac{Q_i}{kT} \right\} = C_i I'_i,$$

где T - температура конденсата; Q_i - теплота испарения молекул компонента i ; n_i - плотность молекул компонента i в конденсате; C_i - концентрация молекул компонента i в конденсате.

При решении системы (1), (2) необходимо выразить величину β через параметры задачи

$$\beta = \frac{\alpha_2 J_1}{J_1 + I'_2}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что β совпадает с коэффициентом прилипания лишь при отсутствии реиспарения молекул второго компонента, т.е. при $I'_2 = 0$. Лишь в этом случае уравнения системы (1), (2) становятся независимыми. Из решения системы (1), (2) видно, что при $I'_2 \neq 0$ величина n_{g2} будет существенно зависеть от интенсивности фазовых переходов первого компонента, т.е. от J_1 и I'_1 .

Для процесса управления составом конденсата необходимо знать зависимость концентрации компонентов в конденсате от параметров падающего газового потока. Эта зависимость при оговоренных предположениях имеет вид

$$C_2 = \frac{\alpha_2 n_{g2} \left(\frac{kT_g}{2\pi m_2} \right)^{1/2}}{J_1 + I'_2}.$$

Таким образом, концентрацию C_2 в конденсате можно изменить, меняя плотность примесного газа в объеме (n_{g2}) либо изменяя температуру конденсата, что приведет к изменению J_1 и I'_2 . Концентрация примесного компонента в конденсате зависит также от скорости конденсации первого компонента, которая при постоянной температуре определяется величиной n_{g1} .

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ВАКУУМНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ

Л.П. Орлов, В.Е. Фертман

Магнитожидкостные уплотнения с использованием магнитного уплотнителя на основе жидкостей с низким давлением насыщенных паров - наиболее перспективные вакуумные уплотнения вращающихся валов. Их достоинства: низкий собственный момент трения, отсутствие износа сопряженных деталей, простота технического обслуживания, способность работать как в динамическом, так и в статическом режимах, свойство "самозалечивания" при нарушении герметичности вследствие динамических ударов уплотняемых сред.

В настоящее время разработаны магнитожидкостные уплотнения, работоспособные при линейных скоростях вращения до 20 м/с, температуре окружающей среды от -40°C до +120°C. Они характеризуются скоростью утечки, меньшей 10^{-11} стандартных см³/с по гелию, выдерживают перепад давления до 40 кН/м² на одну ступень и применимы в условиях вакуума до 10^{-8} мм рт.ст.

Широкое применение магнитожидкостных уплотнений в вакуумном оборудовании ограничивается диссипативным разогревом жидкого магнитного уплотнителя. При высоких линейных скоростях вращения поверхности герметизируемого вала вязкие тепловыделения не компенсируются процессами естественного теплоотвода, что может вызвать вскипание рабочего тела и последующий пробой уплотнения. Следовательно, предельная скорость вращения валов определяется тепловыми процессами в уплотнительном слое.

Тепловые процессы в рабочем зазоре магнитожидкостного уплотнения можно моделировать с помощью дифференциального уравнения второго порядка

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\eta v^2}{\delta^2} = 0, \quad (1)$$

где T - температура магнитной жидкости;

λ - коэффициент теплопроводности;

η - вязкость;

v - линейная скорость вращения поверхности герметизируемого вала;

δ - толщина уплотнительного слоя.

Координатная ось x направлена поперек слоя.

Уравнение (1) можно записать в безразмерном виде

$$\frac{d^2 \hat{T}}{d\zeta^2} + Br = 0, \quad (2)$$

где $\hat{T} = (T - T_0)/T_0$ - безразмерная температура;

$\zeta = x/\delta$ - безразмерная координата;

$Br = \eta v^2 / \lambda T_0$ - число Бринкмана.

Для изотермических граничных условий $\hat{T}|_{\zeta=0} = \hat{T}|_{\zeta=1} = 0$, конкретизирующих значение T_0 из уравнения (2), определяем, что число Br не должно превышать значение $8\hat{T}^+$ (\hat{T}^+ - максимальная температура магнитной жидкости).

Граничные условия при одностороннем охлаждении уплотнительного слоя

$$\left. \frac{d\hat{T}}{d\zeta} \right|_{\zeta=0} = \hat{q}_0; \quad \hat{T}|_{\zeta=1} = 0. \quad (3)$$

Здесь безразмерный тепловой поток \hat{q}_0 вычисляется по величине отводимого через вал теплового потока $q: \hat{q}_0 = \delta q / \lambda T_0$.

В результате решения уравнения (2) с граничными условиями (3) получены диапазоны изменения числа Бринкмана в зависимости от величины отношения \hat{q}_0/Br :

$$\begin{aligned} \hat{q}_0 &= 0 \quad \rightarrow \quad 0 \leq Br \leq 2\hat{T}^+; \\ 0 < \hat{q}_0/Br < 0,5 &\rightarrow \quad 0 \leq Br \leq 2\hat{T}^+ / (1 - \hat{q}_0/Br)^2; \\ \hat{q}_0/Br = 0,5 &\rightarrow \quad 0 \leq Br \leq 8\hat{T}^+; \\ \hat{q}_0/Br > 1 &\rightarrow \quad -2\hat{T}^- / (2\hat{q}_0/Br - 1) \leq Br < \infty; \\ 0,5 < \hat{q}_0/Br < 1 &\rightarrow \quad 2\hat{T}^- (1 - 2\hat{q}_0/Br) \leq Br \leq 2\hat{T}^+ / (1 - \hat{q}_0/Br)^2; \\ \hat{q}_0/Br = 1 &\rightarrow \quad 0 \leq Br \leq -2\hat{T}^-; \quad (\hat{T}^- < 0). \end{aligned}$$

Полученные результаты являются основой для выбора жидкости-носителя при целевом синтезировании магнитных жидкостей. Для более корректного моделирования тепловых процессов в магнитожидкостных уплотнениях необходимо учитывать реальную геометрию зазора, зависимость теплофизических характеристик от температуры и влияние теплообмена через свободные поверхности магнитожидкостной пробки.

ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИОННЫХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ
ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ

Л.Н.Розанов, В.Е.Скавыаев, Н.М.Дульнева, В.В.Гаевский

Разработана методика комплексного определения адсорбционных и теплофизических характеристик адсорбентов при низких давлениях, которая позволяет одновременно определять коэффициент адсорбируемости Γ , эффективный коэффициент стационарной диффузии H и коэффициент температуропроводности α . В процессе исследования определяли временные зависимости температуры засыпки и давления в адсорбционной ячейке после напуска порции газа. Коэффициент Γ рассчитывали из изотерм адсорбции, коэффициент H - из зависимости давления от времени при значениях безразмерного времени, больших 0,2, коэффициент α - из регулярного режима охлаждения засыпки адсорбента.

Создан стенд, реализующий эту методику, состоящий из цельнометаллической сверхвысоковакуумной прогреваемой установки объемного типа для снятия адсорбционных характеристик и стыкуемого с ней гелиевого криостата для создания и поддержания температур от 4,2 до 300 К.

Стенд позволяет за одну загрузку адсорбента определить комплекс его адсорбционных и теплофизических характеристик, влияющих на эксплуатационные характеристики криосорбционных устройств. Работоспособность стенда проверяли при исследовании характеристик активного угля СКТ-М. Получены следующие данные: при $T=77,35$ К $\Gamma=7 \cdot 10^6$ ($P=5 \cdot 10^{-2}$ Па); $H=1,4 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\alpha=4 \cdot 10^{-9}$ м²/с ($P=1$ Па); при $T=290$ К $\Gamma=6 \cdot 10^3$ ($P=5 \cdot 10^{-2}$ Па).

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ,
ПРОТЕКАЮЩИЕ В ЗОНЕ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА ПРИ РАБОТЕ
УЗЛОВ ТРЕНИЯ В РЕЖИМЕ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА

Ю.К.Михайлов, В.С.Поляков, В.М.Лебедев, А.А.Ашейчик

При работе узлов трения в вакууме в результате снижения общего давления окружающей газовой среды на трущихся поверхностях резко уменьшается количество адсорбированных газов, в частности, кислорода. Вследствие этого на поверхностях трения затрудняется возобновление окисных пленок, и при трении

металлов без смазочного материала в вакууме коэффициент трения значительно возрастает, что сопровождается процессами схватывания, задира и повышенным износом поверхностей.

В тех случаях, когда к качественному составу газов в вакуумном объеме не предъявляются особые требования, для смазки узлов трения, работающих в вакууме, можно применять жидкий или пластичный смазочный материал, который в ряде случаев обеспечивает более высокие долговечность и надежность узла трения, чем самосмазывающиеся материалы, твердые смазочные материалы, твердосмазочные покрытия и тонкие металлические пленки.

Долговечность и надежность узлов трения, работающих в вакууме, могут быть повышены использованием явления избирательного переноса (ИП), открытого советскими учеными, которое в атмосферных условиях сопровождается значительным снижением трения и износа. Это предположение основано на литературных сведениях о том, что при работе узла трения в режиме ИП кислород принимает значительно меньшее участие в физико-химических процессах, протекающих в зоне фрикционного контакта, чем в случае трения при граничной смазке.

Исследования возможности использования ИП при трении в вакууме проводили на машине торцового трения в вакууме 1,33-0,1 МПа при нагрузке 0,3-2,5 МПа и скорости скольжения 0,2-1 м/с.

В результате исследований получены зависимости от степени разрежения коэффициента трения, интенсивности изнашивания, температуры узла трения, установившейся шероховатости поверхностей трения и образующихся на них поверхностных слоев. Проведены масс-спектрометрические исследования состава газов в вакуумной камере при наличии в ней различных смазочных материалов, исследована испаряемость этих материалов.

Установлено, что использование явления ИП в узлах трения, работающих в вакууме, позволяет значительно повысить их износостойкость и снизить коэффициент трения. Однако в условиях вакуума работа узла трения в режиме ИП имеет следующие особенности: толщина медной пленки, образующейся на сопряженных поверхностях в процессе трения, увеличивается от 0,2-1 мкм до 1-4 мкм; образование сплошного слоя меди, что свидетельствует об окончании периода приработки, происходит

за 10-20 мин вместо 1-4 ч в атмосферных условиях; указанные процессы сопровождаются некоторым увеличением коэффициента трения.

На основании полученных результатов разработан ряд смазок, способов нанесения твердосмазочных покрытий и способов приработки, которые могут быть использованы для повышения долговечности и надежности вакуумных машин и установок. Для узлов трения, работающих в вакууме, рекомендовано следующее сочетание материалов: бронза БрБ-2 - сталь 45; медь МБ - сталь 45; полиамид П-54, наполненный порошком меди, - сталь 45; фторкаучуковая резина ИРП-1314, наполненная порошком меди, - сталь 45. При этом смазка осуществляется вакуумным маслом ВМ-1 с присадкой 1% олеиновой кислоты.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОДГОТОВКИ К РАБОТЕ ВАКУУМНЫХ КАМЕР ПОСЛЕ КОНТАКТА С АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУХОМ

А.П.Иванов, А.И.Холодов, В.А.Жукова

Авторами предложен новый способ обезгаживания вакуумных камер, заключающийся в том, что камеру заполняют газом до получения атмосферного давления, после чего с помощью внутреннего нагревателя его разогревают до температуры, достаточной для нагрева внутренних поверхностей камеры. В результате нагрева с поверхностей камеры происходит десорбция молекул в газовую среду, через определенный промежуток времени газ откачивают. Последующее обезгаживание происходит в обычном режиме температурной десорбции за счет тепловой инерции нагретых поверхностей.

Цель настоящей работы - исследование эффективности различных методов подготовки к работе вакуумных камер после контакта с атмосферным воздухом.

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы.

Наиболее эффективным способом обезгаживания вакуумных камер после контакта с атмосферным воздухом является вакуумный высокотемпературный прогрев, в результате которого скорость газовыделения может быть уменьшена на два порядка (при температуре прогрева 473 К).

Применение промывки сухим азотом позволяет уменьшить

скорость газовыделения в 3-4 раза.

Предварительный до разгерметизации напуск в камеру сухого азота уменьшает скорость газовыделения в 5-8 раз, но только при условии, если азот впоследствии не замещается атмосферным воздухом.

Прогрев камеры в процессе разгерметизации уменьшает скорость газовыделения в 8-10 раз, однако при его использовании затруднено обслуживание прибора из-за наличия нагретых до высокой температуры деталей.

Метод подготовки вакуумных камер путем обезгаживания при атмосферном давлении по своей эффективности находится на уровне вакуумного высокотемпературного обезгаживания и позволяет уменьшить скорость газовыделения до 50 раз по сравнению с необработанными камерами. Его преимущество по сравнению с вакуумным обезгаживанием заключается в том, что внутренние узлы вакуумной камеры прогреваются более эффективно за счет нагревателя, установленного непосредственно внутри камеры. Кроме того, уменьшается время достижения требуемой температуры, поскольку отпадает необходимость в прогреве всей толщины стенок камеры и уменьшаются температурные градиенты элементов, находящихся внутри нее.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ МОЛЕКУЛ В ВАКУУМНЫХ КАМЕРАХ С ОТКАЧКОЙ

Л.Е.Бойкова, Г.Г.Жмакин, А.П.Ботов, Л.П.Хавкин

При градуировке и проверке рабочих манометрических преобразователей и вакуумметров наиболее часто используется метод непосредственного сличения. При высоком и сверхвысоком вакууме образцовый и рабочие преобразователи присоединяются к градуировочной камере, через которую проходит регулируемый поток газа. С практической точки зрения наиболее удобны не сферические, а цилиндрические камеры, так как они позволяют устанавливать преобразователи вертикально. Однако при этом возникает вопрос, достаточно ли равномерно распределены молекулы в камере, т.е. не будет ли значительной разность концентраций молекул между местами присоединения рабочего и образцового преобразователей.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследова-

ние данного вопроса для цилиндрической камеры диаметром и длиной 300 мм с рассеивающим устройством на входе камеры и клапаном Ду-100 на противоположной стенке. Составлена программа ЭВМ, учитывающая косинусный закон вылета и отражения молекул, и проведен расчет на ЭВМ с помощью метода статистических испытаний (программу можно легко перестраивать для цилиндрических камер других размеров).

Кроме того, проведен расчет изменения проводимости трубы (с диафрагмой на конце) вдоль ее оси, что также позволяет судить о равномерности распределения концентрации. Сконструировано и изготовлено сильфонное устройство с манометром на одном из его концов, которое позволило экспериментально проверить равномерность распределения концентрации молекул как вдоль оси камеры, так и в поперечном направлении при молекулярном режиме течения газа.

Исследования показали, что концентрация газа в данной камере распределена равномерно с погрешностью не более $\pm 1,5\%$.

РАСЧЕТ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ВЫСОКОВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ

М.Н.Ковалев, В.М.Эдельштейн

Цель работы - создание математического описания процесса выделения газов из нагреваемых деталей печи и садки при учете условий газообмена на поверхности и в объеме нагреваемого тела с использованием для решения ЭВМ типа "БЭСМ-6".

Проведенные исследования показали, что удаление газа из металла, нагреваемого до высокой температуры в высоком вакууме, является поверхностным процессом и контролируется скоростью рекомбинации атомов, диффундирующих из металла на поверхность раздела металл-вакуум. С применением этого положения получены граничные условия к уравнениям диффузии для изотермического и нестационарного тепловых режимов.

Разработаны две программы, позволяющие рассчитывать изменение скорости газовой выделения и концентрации растворенного газа в металле в процессе нагрева при изотермическом и нестационарном тепловых режимах. В последнем случае зависимость температуры от времени нагрева выражается линейно-кусочной функцией, состоящей из n участков. В пределах каждого

участка изменение температуры происходит по линейному закону. Таким образом, можно с достаточной точностью выразить практически любой график изменения температуры в печи.

На ЭВМ "БЭСМ-6" рассчитан процесс выделения водорода из вольфрама при 1800°C (изотермический режим) и в интервале температур $1600-2200^\circ\text{C}$ (нестационарный режим). Получены также соответствующие экспериментальные временные зависимости скорости газовой выделения.

Для изотермического режима значения максимальной скорости газовой выделения, определенные экспериментально и расчетным путем, существенно различаются (соответственно $2,4 \cdot 10^{-2}$ и $9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3\text{Па/м}^2 \cdot \text{с}$), а для длительного периода они различаются не более, чем на 40%.

Проведенные расчеты скорости выделения газов из нержавеющей стали и меди показали надежность разработанной программы для ЭВМ в нестационарном тепловом режиме для других конструкционных материалов.

Результаты проведенных исследований и расчетов позволяют использовать ЭВМ в расчетах оптимальных откачных систем вакуумных электропечей сопротивления, работающих при давлении $10^{-2}-10^{-6}$ Па, и наиболее целесообразных режимов термообработки различных материалов: вольфрама, молибдена, ниобия, меди, титана и др. с целью их обезгаживания.

Это, в свою очередь, сокращает затраты, номенклатуру высоковакуумного откачного оборудования и арматуры.

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССЕ ЗАМЕРЗАНИЯ КАПЛИ В ВАКУУМЕ

С.М.Бражников, А.З.Вольнец, Е.В.Гаврилова,
М.Д.Зайденштейн

Сублимационные установки с непосредственным вводом жидких продуктов в вакуумный объем имеют очевидные преимущества (исключение стадии предварительного замораживания, дробления продукта и т.д.) перед аппаратами других видов. В них используется эффект самозамораживания, т.е. замораживание капель вследствие их интенсивного испарения в вакууме. Преимущества этих установок могут быть реализованы при условии, что вводимые жидкости распыляются в виде капель одного размера. Только в

этом случае можно создать в аппарате нужную гидродинамическую обстановку и подобрать подходящий размер частиц, чтобы исключить их унос и сократить продолжительность процесса сушки.

Для построения рациональной системы проектирования такой сублимационной установки с непосредственным вводом жидкости в вакуум необходимой предпосылкой является определение длительности процесса замораживания.

Эта задача решалась для однокомпонентного раствора в условиях, при которых можно пренебречь эффектом начального переохлаждения. Процесс условно разбивался на три стадии. На первой стадии происходит снижение температуры жидкости вследствие ее интенсивного испарения вплоть до начала процесса кристаллизации на поверхности. На второй – фронт кристаллизации продвигается в глубь материала. Эта стадия оканчивается при достижении фронтом кристаллизации центра капли. На третьей стадии снижается температура в объеме вещества до ее значения на поверхности.

Первую и третью стадии удалось свести к классическим задачам теплопроводности, решение которых известно. Длительность второй стадии определялась с использованием метода малых возмущений.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ВАКУУМНОГО ИСПАРЕНИЯ НА СВОЙСТВА КОНДЕНСАТОВ АЛЮМИНИЯ И СЕРЕБРА

Л.К.Лепинь, А.Х.Лусис

Вакуумные конденсаты металлов, особенно в виде тонких пленок, являются нестабильными системами. Их структуру и свойства уже во время образования определяют многие факторы.

Воздействие технологии изготовления покрытия из алюминия или серебра исследовали путем измерения пропускания монохроматического и белого света, электросопротивления R и внешнего фотоэлектрического эффекта, определяемого по работе выхода электронов ϕ и по току эмиссии J . Установлено, что главнейшими факторами, воздействующими на конденсат во время и после его образования, являются состав и давление остаточных газов, при одном и том же интегральном давлении сильно изменяющие свойства конденсатов. Особую роль при этом играют

пары составных частей масел, применяемых в вакуумных насосах.

Исследования проводили при интегральном давлении от 10^{-8} до 10^{-2} Па. Разрежение создавалось различными насосами: ртутным, цеолитовым, ротационным, диффузионным (с азотными ловушками и без них), а также титаново-абсорбционным насосом.

Вымораживанием с помощью обычных азотных ловушек (в виде насосных агрегатов ВА или других конструкций) исключить влияние масел невозможно. Об этом свидетельствуют результаты, полученные при одинаковых интегральных давлениях (в интервале 10^{-5} – 10^{-4} Па), которые достигались различными способами откачки (насосом Н-5 и насосом Трион-150).

Установлено, что парциальное давление кислорода и процесс окисления – не единственные причины, изменяющие свойства пленок. Изменение электрических и оптических показателей свидетельствует как о процессе окисления пленок, так и об изменении их структуры.

У низкоомных ($R < 10^{-1} \frac{\Omega}{\square}$) алюминиевых пленок наблюдается равномерное изменение электросопротивления со временем, у высокоомных ($R > 10^2 \frac{\Omega}{\square}$) пленок, изготовленных с применением масляного насоса, оно изменяется скачкообразно.

Хотя электрический ток при измерениях не превышает 10^{-15} А, из-за структурных особенностей пленок (зернистого или островкового типа) плотность тока на отдельных участках образца может достигать огромных величин. В таком случае наблюдается влияние тока на свойства объекта, следствием чего является повышенная нестабильность пленок.

У образцов, изготовленных в камере с масляными насосами, наблюдается также неоднозначная связь между J и R . Светопропусканию в интервале от 0 до 100% соответствуют значения R от 10^{-1} до $10^2 \frac{\Omega}{\square}$ как для алюминия, так и для серебра, но одному значению R могут соответствовать различные значения J и наоборот, поэтому использовать J и R для определения толщины пленок нельзя. В некоторых случаях можно наблюдать не обратимое воздействие света на электросопротивление.

На существенную роль масел в процессе конденсации металлов указывает также работа выхода электронов. Если в процессе окисления алюминия ϕ изменяется на $\approx 1,7$ эВ, то под

влиянием масел - на 2,5 эВ и более, а эмиссионный ток снижается на 75%.

При комбинированном воздействии света и давления газов можно наблюдать снижение электросопротивления, причем этот процесс обратимый.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОВАКУУМНОЙ СУШКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕД КОНТРОЛЕМ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

В.П.Жуганов, К.С.Касаев, В.И.Крадожен, Г.П.Хилитчи

Исследованы структура сквозных микродефектов в металле и динамика процесса термовакuumной сушки металлических изделий.

В результате металлографических исследований и анализа опытных данных тарировок реальных сквозных микродефектов в металлах взамен известной модели капиллярнопористого тела в качестве новой модели реального сквозного микродефекта в металле принята совокупность чередующихся ячеек (призм) прямоугольной формы, что соответствует современным представлениям о природе и структуре дефектов металла.

Получена зависимость, которая в более общей форме учитывает взаимное влияние различных технологических и физических факторов на продолжительность испарения жидкостей из сквозных микродефектов при термовакuumной сушке металлических изделий перед контролем герметичности. В общем виде она представляет собой многопараметрическую функцию вида

$$\tau = f(d_э, l, \rho_ж, \tau_ж, \rho_n, \lambda_n, \nu_n, \rho_{ср}, D_n, \eta_r, q_{доп}, T_c, P_{вак}),$$

где $d_э, l$ - геометрические размеры канала течи;

$\rho_ж, \tau_ж$ - плотность жидкости и время контакта ее с поверхностью изделия;

$\rho_n, \lambda_n, \nu_n, D_n$ - соответственно плотность, длина свободного пробега молекулы, динамическая вязкость и коэффициент диффузии паров жидкости;

$\rho_{ср}$ - плотность среды, в которую происходит испарение;

$\eta_r, q_{доп}$ - вязкость и допустимая негерметичность по потоку контрольного газа;

$T_c, P_{вак}$ - параметры сушки (температура и степень разрежения).

Экспериментальными исследованиями термовакuumной сушки сквозных микродефектов, заполненных водой и хладоном-113, подтвердили полученную аналитическую зависимость, которая позволяет определять время сушки с учетом времени выхода изделия на режим по температуре и степени разрежения, непрерывного углубления мениска жидкости, требований к допустимой негерметичности, режимов технологических нагревов металла, физических свойств жидкости и ее паров, технологических параметров сушильной установки.

Сравнительная оценка расчетных значений времени сушки по предложенной зависимости с экспериментальными показала сходимость результатов в пределах $\pm 7\%$.

Рекомендации, разработанные в результате исследований, отражены в отраслевом стандарте ОСТ 92-0019-78 "Методы и режимы сушки изделий перед испытаниями на герметичность", а также реализованы в технологических процессах сушки изделий в термовакuumной камере объемом 160 м³.

ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ В СВЕРХВЫСОКОМ ВАКУУМЕ, СОЗДАВАЕМОМ КРИОГЕННЫМИ СРЕДСТВАМИ ОТКАЧКИ

В.С.Коган, Ю.Е.Семенов, А.Л.Донде, В.М.Шулаев

Исследовано влияние вакуумных условий на структуру и свойства пленок ниобия и хрома в процессе их получения.

Предварительное разрежение от атмосферного давления до $(3-5) \cdot 10^{-2}$ Па создавалось угольной адсорбционной ловушкой, охлаждаемой жидким азотом. От $5 \cdot 10^{-2}$ до $7 \cdot 10^{-7}$ Па откачка велась криогенным адсорбционным насосом с жидким водородом в качестве хладагента.

Пленки получали методом термического испарения с помощью электроннолучевой пушки или резистивного нагревателя. Поликристаллические пленки ниобия (хрома) конденсировались на нагретые стеклянные подложки со скоростью 10 Å/с. Для создания контролируемой остаточной атмосферы в камеру через биметаллический натекаль напускался газ (азот, водород, гелий, кислород). В процессе конденсации давление газа поддерживалось постоянным в интервале от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ Па.

Количество азота, захваченного пленкой, определяли методом обратного рассеивания ядер $^4\text{He}^{++}$, фазовый состав пленки

нок и внутренние напряжения - методами рентгеновской дифрактометрии.

Пленки ниобия и хрома, полученные в глубоком криогенном вакууме при температурах подложки $\approx 200-300^\circ\text{C}$, характеризуются мелкодисперсной структурой с большим количеством дефектов кристаллического строения и высоким уровнем внутренних растягивающих напряжений $\approx 80 \text{ кгс/мм}^2$ для хрома и $\approx 65 \text{ кгс/мм}^2$ для ниобия.

Возникновение растягивающих напряжений связано, по-видимому, с изменением удельного объема при совершенствовании структуры, протекающем при переходе конденсата в более равновесное состояние как во время формирования, так и в послеконденсационный период. Изменение напряженного состояния пленок хрома, полученных в газовых средах, различно и связано с различной адсорбционной способностью хрома по отношению к разным газам. Газ, хемосорбированный на поверхности растущего слоя, растворяется в пленке, располагаясь преимущественно на границах зерен и на кристаллических дефектах (комплексах вакансий), снижая их подвижность. Это приводит к торможению развития растягивающих напряжений и даже к возникновению сжимающих макронапряжений вследствие образования соединений атомов газа с матрицей металла на границах зерен.

Для пленок ниобия, полученных в глубоком криогенном вакууме, критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_K \approx 9,2 \div 9,35 \text{ K}$ и лишь при малых толщинах $\approx 300 \text{ \AA}$ уменьшается до $8,2 \text{ K}$. Ширина сверхпроводящего перехода, являющаяся чувствительной мерой однородности структуры, не превосходит $0,05 \text{ K}$ для пленок толщиной более 1000 \AA .

СОЗДАНИЕ И ДЛИТЕЛЬНОЕ ПОДДЕРЖАНИЕ ВАКУУМА В КРИОГЕННЫХ ЕМКОСТЯХ С ВАКУУМНО-МНОГОСЛОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

М.Г.Каганер, Ю.Н.Фетисов

Применение в сосудах и цистернах для криогенных жидкостей высокоэффективной вакуумно-многослойной термоизоляции (ВМИ) потребовало создания и поддержания в изоляционной полости давления не более 10^{-3} Па , которое необходимо со-

хранять без повторного вакуумирования в течение всего периода эксплуатации. Для этого должна быть обеспечена герметичность изоляционной полости, а также тщательно обезгажены находящиеся в ней материалы. Вакуумирование осуществляется с прогревом при температуре от 100 до 200°C . Невозможность прогрева до более высоких температур, обусловленная конструкцией емкостей, применяемыми материалами и относительно большими размерами, приводит к увеличению продолжительности вакуумирования. Прогрев и вакуумирование изделий заканчиваются при достижении заданных величин газовыделения и натекания, которые определяются из условий обеспечения требуемого вакуума при заливе криогенной жидкости и сохранения его в течение срока эксплуатации за счет поглощения натекающих и выделяющихся газов адсорбентом.

Установлены допустимые величины натекания и газовыделения на конечном этапе при температурах прогрева и окружающей среды. Произведена расчетная оценка возможности сохранения вакуума в емкостях с ВМИ в течение срока эксплуатации. Показано, что в некоторых случаях может иметь место ухудшение вакуума с течением времени из-за накопления неадсорбируемых примесей неона и гелия.

Предложен комбинированный способ вакуумирования цистерн, позволяющий существенно сократить длительность откачки. Этот способ внедрен в серийном производстве цистерн вместимостью $0,5 \text{ м}^3$.

Показано влияние качества вакуумирования изделий на испаряемость в зависимости от времени эксплуатации.

Испытания партии сосудов СДС-20 вместимостью $0,12 \text{ м}^3$, изготовленных в 1975 г., показали, что величина испаряемости за время эксплуатации в течение 4 лет не изменилась. Аналогичные результаты получены при выборочной проверке нескольких серийно выпускаемых цистерн ЦТК-0,5/0,25 вместимостью $0,5 \text{ м}^3$, находящихся в эксплуатации в течение 1-3 лет.

Проведенные расчеты и испытания криогенных емкостей с ВМИ позволяют сделать вывод, что при хорошем качестве изготовления они могут эксплуатироваться в течение 10 лет без повторного вакуумирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОТДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НЕПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ В ДИФфуЗИОННОМ И ДЕСОРБЦИОННОМ РЕЖИМАХ

В.Ф.Гетманец, Р.С.Михальченко, В.С.Гайдамака

Цель работы - теоретическое и экспериментальное исследование особенностей процессов вакуумирования непрогриваемых или низкотемпературных вакуумных систем, например пакетов экранно-вакуумной теплоизоляции. Спектр газотделения таких систем на 90-95% состоит из паров воды, которые не только адсорбированы на поверхности вакуумных материалов, но и в большинстве случаев растворены в их объеме. Скорость газотделения паров воды и других газов с большим временем адсорбции τ_a в значительной степени определяется многократными процессами адсорбции-десорбции их молекул на поверхностях вакуумной системы.

Для упрощения теоретического анализа динамики газотделения рассмотрим процесс вакуумирования в молекулярном режиме сосуда с однородным давлением по его объему при десорбции паров воды как с поверхности вакуумных материалов, так и с их объема. Можно считать, что для многих вакуумных материалов (полимеров, стекол, микропористых окислов) растворение и диффузия паров воды протекают в молекулярной форме без диссоциации на атомы. При этом из уравнений сохранения массы газа в объеме вакуумной системы и ее материалов, а также в адсорбированном монослое получена система уравнений, описывающая процесс вакуумирования.

Анализ аналитического решения полученной системы уравнений для сильно адсорбируемых газов с $\tau_a \gg \tau_{пр}$ ($\tau_{пр}$ - характерное время пролета вакуумной системы) позволил установить, что существуют три характерные области, в которых газотделение материалов определяется различными законами.

Область $Bi^* \gg 1$ - диффузионная, так как здесь интенсивность газотделения определяется скоростью диффузии молекул газа из твердого тела, а заполнение адсорбированного монослоя быстро стремится к нулю из-за большой скорости откачки вакуумной системы

$$Bi^* = \frac{S_0}{S_z} \frac{1}{\tau_a} \frac{\beta_0 l_D}{D},$$

где $\beta_0 = a \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{RT}\right)$;

a - постоянная решетки твердого тела;

ΔE - активационный барьер перехода через поверхность твердого тела;

S_z, S_0 - суммарная площадь поверхности вакуумной системы и площадь откачного отверстия;

l_D - толщина диффузионного слоя материала;

D - коэффициент диффузии молекул, растворенных в твердом теле.

Область $Bi^* \ll 1$ - десорбционная. В ней газотделение определяется скоростью десорбции газа из монослоя. В промежуточной области $0,1 \leq Bi^* \leq 100$ следует учитывать оба указанные явления.

Общепринятое положение о независимости скорости газотделения от условий вакуумирования справедливо только для диффузионной области с малым сопротивлением газообмену через поверхность твердого тела ($\bar{H} = \frac{\beta}{l_D} \ll 1$).

Для области $Bi^* \gg 1$, $\bar{H} \ll 1$ и с большой длительностью вакуумирования ($\tau \geq 0,1 \tau_D$) скорость газотделения можно описать соотношением

$$W_s = \frac{\pi}{4} \left(1 + \frac{\tau_{np}}{\tau_a}\right) \frac{n_m}{\tau_D \bar{H}} \frac{v_a^2 M}{\alpha N_A} \exp\left(-\frac{\pi^2 \tau}{4 \tau_D}\right),$$

где $\tau_D = \frac{l_D^2}{D}$ - характерное время диффузии из твердого тела; n_m - плотность молекул в максимально заполненном поверхностном монослое. При продолжительности вакуумирования $\tau \leq 0,1 \tau_D$ характерен неустановившийся режим диффузии со скоростью газотделения

$$W_s = \frac{\pi}{8} n_m \frac{v_a^2 M}{\alpha N_A} (D/\pi \beta^2 \tau)^{1/2}.$$

Для десорбционной области газотделения справедливо соотношение

$$W_s = \frac{1}{4} v_a \frac{S_0}{S_z} P_m \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_{жз}}\right),$$

где $P_m = \frac{2}{\pi} \frac{n_m N_A}{v_a M \alpha \tau_a}$ - давление, при котором заполняется адсорбционный монослой молекулами до максимальной плотности $n = n_m$; $\tau_{жз} = \tau_{ж} \frac{1+H}{H}$ - характерное время газообмена.

При $\bar{H} \gg 1$ $\tau_{жз} = \tau_{ж} = \frac{S_z}{S_0} (\tau_a + \tau_{np})$, т.е. скорость газотделения определяется только скоростью десорбции молекул.

кул из адсорбированного на поверхности твердого тела моно-слоя и не зависит от скорости диффузии газа в твердом теле. Такая ситуация характерна для значительного потенциального барьера на поверхности твердого тела $\Delta E \gg RT \ln \frac{l_D}{\beta}$, когда газ-адсорбат слабо растворим или вообще не растворим в рассматриваемом материале.

Для хорошо растворимых газов при $H \ll 1$ $\tau_{жз} = \frac{l_D}{\beta \tau_{ж}}$. В этом случае процесс вакуумирования протекает в объемно-десорбционном режиме, т.е. таким образом, как если бы весь растворенный в твердом теле газ находился в адсорбционном монослое на его поверхности с плотностью размещения молекул, равной n_m . Длительность достижения заданного уровня газоотделения увеличивается с увеличением толщины твердого тела пропорционально отношению $\frac{l_D}{\beta}$. Такой режим наблюдался при экспериментальных исследованиях бумажных материалов из тонких полимерных волокон.

При экспериментальном изучении газоотделения методом потока в качестве исследуемых материалов были использованы бумаги на основе стеклянных, базальтовых и полимерных микроволокон. Их размещение в вакуумной полости позволило легко создать условия $Bi^* \ll 1$. Проведенные эксперименты подтвердили наличие трех различных режимов газоотделения.

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЛИННОФОКУСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК МОЩНОСТЬЮ 15 И 100 кВт

Г.Ф.Ивановский, Р.М.Яхин, А.А.Буянкин, Н.А.Козырева,
В.М.Прокопьев, В.В.Суренянц, В.М.Трач, В.А.Ушаков

Разработана длиннофокусная электронная пушка с аксиально-симметричным пучком мощностью 15 кВт. Первеанс пучка, формируемого пушкой, составляет $(1 \div 1,2) 10^{-6}$ А/В^{3/2}. Формирование интенсивного протяженного электронного потока малой угловой расходимости осуществляется с помощью простой системы, состоящей из сферической пушки Ширса и короткой магнитной линзы, размещенной на анодном блоке пушки. Магнитная линза создает неоднородное магнитное поле, которое служит одновременно для магнитного сопровождения пучка в пространстве катод-анод пушки и фокусировки нейтрализованного потока в пространстве

дрейфа. Объектом для магнитной линзы служит кроссовер электронного пучка на выходе из анода. Изображение кроссовера определяет диаметр пучка в пространстве дрейфа.

Для обеспечения сравнительно резкого нарастания магнитного поля, которое требуется при сопровождении пучка, отношение катодного радиуса к анодному принято равным 2,25. При этом кроссовер пучка максимально удален от анода пушки и его сечение достаточно мало.

Условия, необходимые для получения хорошо сформированного потока, обеспечиваются совокупным действием электрических и магнитных сил в области пушки и вне ее – на участке неоднородного магнитного поля. Изменяя ток, протекающий через катушку, можно менять фокусное расстояние линзы, а следовательно, диаметр и расходимость пучка в пространстве дрейфа. При изменении оптической силы линзы магнитное поле в пушке практически не меняется.

Катодный блок пушки, объединяющий накальный узел, эмиттер и фокусирующий электрод, выполнен в виде цилиндрического штока и установлен на базовом металлокерамическом высоковольтном изоляторе. Такая конструкция позволяет быстро сменить вышедшие из строя накальную спираль или эмиттер и затем установить строго соосно с анодом на заданном от него расстоянии. Разогрев эмиттера производится бомбардировкой электронами, источником которых служит плоская вольфрамовая спираль специальной конструкции.

В пушке применен танталовый эмиттер с диаметром 10 мм и радиусом сферы 8 мм. Общая мощность, затрачиваемая на подогрев эмиттера, составляет ≈ 450 Вт. Срок службы эмиттера, определяемый действием ионной бомбардировки, составляет 300 ч.

Достоинствами разработанной пушки являются большая компрессия пучка по площади (до 60) и малый ток, перехватываемый анодом – медной вставкой с внутренним диаметром 3 мм.

Изучение структуры пучка, проведенное при различных значениях первеанса, индукции магнитного поля, давления остаточных газов и радиуса кривизны эмиттера, показало, что форма радиального распределения плотности тока, соответствующая ламинарному потоку, при оптимальном выборе параметров сохраняется на разных расстояниях от пушки. При длительной эксплуатации пушка обеспечивает стабильность удельной мощности

пучка, т.е. гарантирует воспроизводимость скорости испарения материала при неизменной общей мощности.

Создана пушка аналогичной конструкции мощностью 100 кВт при величине ускоряющего напряжения 20 кВ. Первенец пучка составляет $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^{3/2}$. Эмиттер имеет диаметр 17 мм, радиус сферы – 13 мм; внутренний диаметр анода – 5 мм.

Использование пушки мощностью 15 кВт в качестве источника испарения при создании макетного образца установки для термоионного нанесения пленок обеспечило устойчивую работу установки на целом ряде металлов с большим газостделением.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОРБИТРОННОЙ СИСТЕМЕ В СВЯЗИ С СОСТАВОМ ОСТАТОЧНОЙ СРЕДЫ И ПРЕДЕЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ

З.З. Зыман

Путем дифференциации процессов, одновременно протекающих в орбитронных геттерно-ионных насосах (ОГИН), выяснен генезис остаточной среды орбитронных систем при предельном давлении. Показано, что за исключением благородных газов, являющихся "памятью" о воздушной среде, присутствие других компонентов обусловлено рядом физико-химических реакций на поверхности испарителя и титановой сорбирующей пленки. Вмешиваясь в течение этих процессов, можно в желаемом направлении менять состав газовой среды и фоновое давление в системе.

Исследованы поверхностные явления на фазовых границах массивного и пленочного титана, в результате которых в откачиваемых ОГИН сверхвысоковакуумных системах появляются предельные углеводороды. Установлены конкретные реакции, по которым идет процесс, оптимальные условия их течения. На основании этого предложены два способа понижения давления предельных углеводородов в системе, заключающихся в ограничении количества "сырья", необходимого для этих реакций. Реализация этих способов позволяет понизить давление летучих углеводородов в геттерно-ионных орбитронных системах примерно в 10 раз.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

И.Ф. Ахмеров, З.М. Бедретдинов, Ф.М. Гайсин, Г.Ю. Даутов

В настоящее время высоковольтный электрический разряд находит широкое применение в вакуумной и лазерной технике, плазмохимии, а также для получения электронных пучков. В связи с этим исследование тлеющего разряда (ТР) в потоке разреженных газов становится актуальной задачей. В данной работе исследуются распределения плавающего потенциала U_f , напряженности электрического поля \vec{E} , анодного U_a и катодного U_k падений потенциала в самостоятельном ТР в поперечном потоке воздуха и их зависимости от интенсивной турбулизации в прикатодной области. Разрядная камера (РК) состоит из диэлектрических боковых стенок, платы с пластинчатым медным катодом и сплошного медного анода, образующих канал прямоугольного сечения. Эксперименты проводили в диапазоне статического давления $(3,5-10) \cdot 10^3 \text{ Па}$, расхода воздуха $(2-8) \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$ и скорости потока $(10-50) \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при межэлектродном расстоянии 0,03 м.

При исследовании распределения U_f установлено следующее. В поперечном потоке воздуха разряд сносится и картина распределения U_f искажается. Турбулизация потока в прикатодной области приводит к более симметричному распределению эквипотенциальных линий. Распределение U_f вблизи катода более однородно. Эквипотенциалы в направлении к аноду сгущаются. Отсюда следует, что величина $|\vec{E}|$ в разряде увеличивается от катода к аноду. Вблизи катода распределение \vec{E} становится более однородным. По измеренным значениям U_f методом графической экстраполяции на поверхности электродов определяли величины U_k и U_a . Минимальные значения анодного падения потенциала соответствуют зонам прианодного свечения. Вне этой зоны U_a увеличивается. Турбулизация потока около катода приводит к смещению области анодного свечения вперед. Анализ опытных данных показал, что в исследованном диапазоне параметров $U_k = 270 \div 430 \text{ В}$, $U_a = 80 \div 140 \text{ В}$. Распределение U_f в поперечном направлении РК остается почти постоянным при условии, если катодное пятно покрывает всю поверхность электрода.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗОРА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СУБЛИМАЦИОННОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

В.В.Васильев, В.М.Постников

Для консервирования биопрепаратов широко применяется процесс их сублимационного обезвоживания в вакууме. Жесткие требования к соблюдению асептических условий консервирования обусловили необходимость размещения биопрепаратов в различных сосудах. Теоретический анализ и практика консервирования показывают, что в процессе сублимационной технологии уже в период установления давления в аппарате происходит отрыв замороженного биопрепарата от стенки сосуда. В результате между ними образуется зазор, термическое сопротивление которого в условиях вакуума имеет существенное значение.

Величина зазора зависит от многих факторов: формы и материала сосуда, качества его поверхности, способа замораживания и т.д. В условиях сублимационного обезвоживания величина зазора соизмерима с длиной свободного пробега молекул водяного пара, а массовый поток водяного пара из зазора на три порядка ниже, чем со свободной поверхности биопрепарата. В связи с этим поверхность фазового перехода, являющаяся границей раздела между сухой и замороженной зоной, движется от свободной поверхности биопрепарата к стенкам сосуда.

При решении задачи зазор разреженного газа заменяли эквивалентным ему по термическому сопротивлению фиктивным слоем замороженного биопрепарата.

Задача рассматривалась при постоянных температуре стенки сосуда и давлении в сосуде.

Приняты следующие допущения: замороженный биопрепарат изотропен; теплофизические свойства замороженного биопрепарата, за исключением коэффициента термической деформации, неизменны; поверхность фазового перехода является четкой границей между сухим и замороженным слоем; температура поверхности фазового перехода одинакова во всех точках и соответствует давлению в сосуде по кривой равновесия; процесс рассматривается в квазистационарном приближении.

Для упрощения задачи реальные зависимости коэффициента термической деформации $K = f_1(T)$ и давления $1/p = f_2(T)$ в рассматриваемом диапазоне заменяли линейными уравнениями. Полу-

чено аналитическое решение задачи.

Расчеты показали, что существует область оптимальных давлений, при которых интенсивность процесса максимальна. Это объясняется взаимно противоположным влиянием увеличения давления на величину теплового потока, передаваемого через зазор: с одной стороны, возрастает теплопроводность газовой прослойки, с другой – увеличивается зазор и уменьшается температурный перепад в нем. Преобладающее влияние того или иного фактора на процесс зависит от числа Кнудсена и природы обезвоживаемого материала.

ИМПУЛЬСНАЯ ФОТОДЕСОРБЦИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ФИЗИКЕ ВАКУУМА И ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ

Р.Б.Тагиров, Г.А.Дружинин

При использовании вместо стационарных источников света или оптических квантовых генераторов (ОКГ) импульсных ламп типа ИФП-2000 может быть достигнута интенсивность излучения 10^4 Вт/см² и более, т.е. почти такая же, как и в луче ОКГ, работающего в режиме свободной генерации. Однако излучение импульсных ламп выгодно отличается от излучения ОКГ тем, что имеет сплошной спектр и содержит в себе не только мягкое ультрафиолетовое излучение, но и значительную часть вакуумного ультрафиолета, если колбы ламп изготовлены из кварца КУ-1. Благодаря этому средняя по длинам волн эффективность фотодесорбции молекул воды с поверхности стекла достигает 10^{-2} мол/фотон, что делает излучение ламп конкурентоспособным с такими явлениями, как электронная и ионная бомбардировка.

Оптимальную интенсивность, необходимую для удаления полного монослоя молекул воды с поверхности стекла за один импульс, определяли путем облучения внутренней поверхности цилиндрических мишеней, расположенных под вакуумным колпаком осесимметрично по отношению к трубчатой прямой лампе и цилиндрической части высокого вакуумного колпака.

Получена формула, связывающая число десорбированных молекул n , с первой поверхности стеклянного цилиндра с полным числом десорбированных молекул и площадями облучаемых поверхностей.

Построена кривая зависимости n , от радиусов цилиндров, которая показывает, что десорбция молекул воды с поверхности стекла зависит от интенсивности нелинейно, а при достижении интенсивности 4600 Вт/см^2 (при напряжении 1600 В) происходит скачок. При интенсивности 6600 Вт/см^2 наступает насыщение и с единицы площади мишени десорбируют $1,85 \cdot 10^{15}$ молекул, что равно удвоенному числу молекул, необходимых для покрытия идеально плоской поверхности стекла слоем в одну молекулу. По-видимому, превышение числа десорбированных молекул над номинальным объясняется лишь тем, что реальная открытая поверхность стекла больше геометрически измененной почти в 2 раза.

Увеличение напряжения питания до 2000 В приводит к насыщению десорбции уже при интенсивности 5500 Вт/см^2 .

Электронно-микроскопические исследования показали, что взрывообразная десорбция адсорбированных молекул излучением импульсных ламп обеспечивает почти полное удаление даже микроскопических твердых включений с поверхности полированных образцов.

О ВРЕМЕНИ АДсорбЦИИ В ВЫСОКОМ ВАКУУМЕ МОЛЕКУЛ ВОДЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЕЕ СВЕТОМ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

Р.Б.Тагиров, Ф.Х.Вахитов, С.А.Машкевич

Проведено экспериментальное измерение времени покрытия поверхности стекла в высоком вакууме слоем в одну молекулу после очистки поверхности мишени от ранее адсорбированных молекул излучением мощных импульсных ламп.

Исходные предпосылки.

1. На открытой поверхности стекла при вакууме $\approx 10^{-3} \text{ Па}$ всегда имеется монослой молекул H_2O .

2. Экспериментально установлено, что при выполнении первого условия и интенсивности падающего на мишень излучения 600 Вт/см^2 между электродами трубчатой лампы (при условиях эксперимента) по поверхности стекла зажигается скользящий разряд. При этом излучение лампы и открытого скользящего разряда десорбирует с поверхности мишени площадью в 1 см^2 все 10^{15} молекул. Если плотность адсорбированных молекул

меньше 10^{15} см^{-2} , скользящий разряд не зажигается и число десорбированных молекул оказывается на порядок меньше.

3. Адсорбция молекул на поверхности мишени после очистки светом происходит за счет их диффузии из микротрещин и десорбции с поверхности стенок, не подвергавшихся облучению.

Эксперимент проводили следующим образом. Сначала поверхность мишени очищалась импульсом излучения при интенсивности, достаточной для удаления всего монослоя за один импульс. При этом вакуум в системе падает до 1 Па . Далее выдерживалась пауза для того, чтобы на очищенной поверхности мишени адсорбировались молекулы воды. Одновременно из объема откачивались молекулы, десорбированные претчим импульсом света. Затем давались импульсы света через определенные промежутки времени, отсчитываемые от момента очистки поверхности световым импульсом, и измерялось количество молекул, десорбированных этими импульсами.

При увеличении времени адсорбции до 4 мин число десорбированных молекул не превышало 10^{14} см^{-2} , т.е. отсутствовало накопление полного монослоя; в промежутке $4 < t < 5$ мин происходил скачок десорбции более чем на порядок. Характер излучения лампы также резко менялся. Если до 4 мин с увеличением времени адсорбции интегральная интенсивность импульса оставалась постоянной и достаточно высокой, а осциллограмма показывала нормальное горение лампы, то при дальнейшем его увеличении происходили снижение интенсивности и срыв горения лампы из-за зажигания скользящего разряда, что также указывает на образование полного монослоя адсорбированных молекул.

Сделан вывод, что время образования полного монослоя адсорбированных молекул воды в высоком вакууме на поверхности стекла после очистки ее импульсами света лампы ИП-2000 составляет не менее 4 мин вместо 2 с, полагаемых из элементарной теории для поверхности стекла при высоком вакууме. Это объясняется существенным изменением физических свойств поверхностного слоя стекла под действием мощного потока фотонов. Однако в начальный период определенный вклад вносят и элементарные процессы между атомарным водородом, образующимся в результате диссоциации молекул воды, и другими частицами, адсорбированными после импульса света на поверхности стекла.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ИХ ОБЛУЧЕНИЯ В ВАКУУМЕ МОЩНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ЛАМПАМИ

Р.Б.Тагиров, Г.А.Дружинин, А.Л.Глазенап

Наиболее важной проблемой технологии формообразования оптических поверхностей является разработка методики удаления с поверхности прилегающего к массивной подложке нарушенного слоя не только инородных включений, внедренных в большом количестве в процессе формообразования, но и адсорбированных молекул поверхностных соединений ($\approx 10^{19}$ мол/м²).

Для решения этой задачи перспективно использование современных мощных источников света, интенсивность которых в импульсе на расстоянии 1 см от поверхности колбы лампы достигает 10^8 Вт/м².

Облучение образцов после их очистки по обычной методике проводилось в вакууме $(1,33 \pm 13,3) \cdot 10^{-3}$ Па двумя-тремя вспышками света импульсной лампы типа ИП-2000 с колбой из кварца марки КУ-1, прозрачного в спектральной области 4,5 мкм - 166 нм. Интенсивность падающего лучистого потока составляла порядка $6,6 \cdot 10^7$ Вт/м². Изменения свойств поверхности контролировались электронно-микроскопически, а также измерением интегрального и локального коэффициентов отражения, рассеяния света и лучевой прочности покрытий, нанесенных на облученную поверхность.

В случае медных, германиевых и кремниевых образцов в результате облучения коэффициент отражения в области 0,69 мкм увеличивается на 0,5-0,8 \pm 0,1%, рассеяние уменьшается на 0,2-0,3%, лучевая прочность возрастает на 40-50%. Электронно-микроскопическое изучение поверхности показало, что на медных образцах тонкая пленка жировых загрязнений и адсорбированных газов удаляется полностью. Почти полностью удаляются включения полирующего вещества. На образцах с большой прочностью и химической устойчивостью (кремний, германий, стекло) достигается практически полная очистка. Рельеф поверхности при этом не меняется, новых образований не происходит.

Таким образом, облучение поверхности полированных материалов в вакууме светом мощных импульсных ламп обеспечивает по сравнению с другими методами более полную очистку без каких-либо структурных изменений и ухудшения их оптико-механических параметров.

РАСЧЕТ РАДИАЛЬНОГО НАСОСА С БАРАБАННЫМИ РЕШЕТКАМИ МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Г.А.Гарбуз, В.П.Иванов, Ю.М.Тузанкин, В.Н.Шалымов

Для расчета турбомолекулярного насоса достаточно определить вероятности перехода молекул через решетки по потоку P_{12} , против потока P_{21} и через зазоры между ними ΔP . Разность вероятностей $P_{12}-P_{21}$ характеризует быстроту действия, их отношение P_{12}/P_{21} - отношение давлений. При расчете барабанных насосов необходимо учитывать вращательное движение неодинаковых по размерам решеток, при котором скорости элементов каналов различаются по величине и направлению, а также возможен радиальный разброс молекул. Для нахождения вероятностей перехода через каналы различных геометрий применялся метод статистических испытаний, в котором моделировалось случайное движение молекул.

Для моделирования использовался универсальный способ расчета вакуумных систем, по которому истинная траектория движения молекулы в канале заменяется ступенчатым движением по ближайшим к траектории узлам вписанной в канал двухмерной кодировочной решетки. Ступенчатое движение по узлам, ближайшим к криволинейной траектории движения молекулы, обеспечивалось линейной акстрополяцией траектории в пределах одной клетки кодировочной решетки.

Проведены расчеты вероятностей перехода молекул P_{12} и P_{21} для 5 отдельных решеток ротора, различающихся геометрическими соотношениями каналов, и 5 решеток статора, установленных внутри роторных, при сходных по геометрии каналах.

В первом случае расчет проведен для относительных скоростей: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1, во втором случае, с одной стороны, учитывалась относительная скорость, наведенная роторной решеткой, с другой - газ считался максвелловским. Кроме того, проведен расчет вероятностей для разрабатываемого радиального насоса со встречным вращением роторов при частоте вращения: решеток 30 и 100 с⁻¹; встречного ротора 0; 50; 100 с⁻¹.

Следует отметить, что во всех случаях при увеличении

скорости решеток вероятность перехода молекул со входа на выход P_{12} увеличивалась, во встречном направлении P_{21} — уменьшалась.

Для подтверждения достоверности полученных результатов проведена их проверка на экспериментальном насосе.

Экспериментальный насос представлял собой герметичную камеру, в которой на вращающемся валу устанавливалась барабанная решетка, разделяющая камеру на две полости: входную и выходную. В камере с помощью диффузионного насоса поддерживалось давление от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ Па.

При вращении решетки измерялась быстрота действия и отношение давлений в полостях, по которым затем рассчитывались разность $P_{12} - P_{21}$ и отношение P_{12}/P_{21} вероятностей.

Максимальное расхождение экспериментальных результатов с теоретическими не превышает 16%, что укладывается в пределы погрешности экспериментов. Систематическое превышение экспериментальных результатов объясняется концевым насосным эффектом каналов.

Полученные результаты сравнивали также с результатами расчетов методом интегральных уравнений. Совпадение результатов, полученных различными методами, подтверждает правильность обеих методик.

II СЕКЦИЯ

МЕХАНИЧЕСКИЕ, ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ И СТРУЙНЫЕ НАСОСЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ВИНТОВОЙ СХЕМЫ МАСЛОЗАПОЛНЕННОГО ФОРВАКУУМНОГО НАСОСА ВЫСО- КОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

А.К.Щедов, Л.П.Пашков

Исследовалось влияние конструктивных факторов на рабочие характеристики маслозаполненного винтового вакуум-насоса, разработанного на базе винтового компрессора, имеющего асимметричный профиль винтов. Представлены схема экспериментальной установки и методика проведения эксперимента.

Изучено влияние выхлопного клапана, подвода смазки и герметизации рабочей камеры на основные характеристики винтового вакуум-насоса.

Выявлена возможность дальнейшего расширения области применения винтовых вакуум-насосов по предельному остаточному давлению всасывания.

Результаты исследований в сравнении с технико-экономическими характеристиками насосов других конструктивных схем позволят отнести маслозаполненный винтовой форвакуумный насос к наиболее перспективным откачным средствам высокой производительности.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАСЛОЗАПОЛНЕННОГО ПЛАСТИНЧАТО-РО- ТОРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

А.К.Щедов, В.И.Васильев

Исследовался быстроходный маслозаполненный двухступенчатый пластинчато-роторный вакуум-насос типа 2НВР-5Д (ГОСТ 14707-77).

Изучена зависимость объемных и энергетических характеристик насоса от ряда конструктивных факторов: подачи смазки, частоты вращения ротора, угла опережения цикла сжатия низковакуумной ступени, промежуточного объема и соотношений описанных объемов рабочих камер.

Полученные результаты с завершением экспериментального исследования соотношений рабочих камер позволят усовершенствовать конструкцию наиболее эффективных откачных средств малой производительности и будут использованы в разработке современного ряда маслозаполненных пластинчато-роторных вакуум-насосов производительностью до 40 л/с.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДВУХРОТОРНОГО ВИНТОВОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

М.Г.Шакиров, Ф.Д.Путиловский, Ш.У.Сайфуллин

Расширить рабочий диапазон двухроторных вакуумных насосов (ДВН) можно путем усовершенствования системы охлаждения насосов. Поскольку склонность к перегреву у ДВН обусловлена внешним сжатием, проблема решается созданием двухроторного вакуумного насоса с внутренним сжатием, что возможно при замене у роторов профилей Рутса винтовыми. Расчеты показывают, что такие насосы будут потреблять мощность меньше на 25–40%.

Предполагается, что за счет меньшего тепловыделения новые насосы смогут работать при больших входных давлениях. Такое заключение основано на том факте, что ДВН с профилем Рутса в режиме газодувки имеют допустимую степень сжатия 1,4–1,8; при давлениях, близких к 1 мм рт.ст., – допускают без перегрева степень сжатия 10, а компрессоры с винтовым роторным механизмом при атмосферном давлении на входе имеют допустимую степень сжатия 3–4. По аналогии можно предположить, что двухроторные винтовые вакуумные насосы будут иметь большие чем у ДВН значения этого коэффициента во всей области низкого вакуума.

Исследования по изучению и созданию двухроторного винтового вакуумного насоса проводятся на его модели, созданной на базе винтового компрессора сухого сжатия ВК-4/5–13 Казанского компрессорного завода. Степень внутреннего сжатия модели 2,6, профиль зубьев у роторов – окружной. Эксперименты ведутся на испытательном стенде, позволяющем определить параметры двухроторного вакуумного насоса и его теплового режима. Отношение скорости действия исследуемой модели и вспомогательного насоса на стенде может регулироваться до 1:1, частота вращения ведущего ротора – до 7500 об/мин.

Сравнительный анализ основных насосных характеристик модели (предельного остаточного давления, скорости действия, характера изменения значения скорости действия от входного давления, значение коэффициента наибольшего сжатия) с аналогичными параметрами насоса ДВН-50 серийного агрегата АВР-50 позволяет сделать вывод о том, что могут быть созданы насосы с винтовыми роторами с комплексом откачных свойств серийных ДВН.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ДИАМЕТРА КАНАЛА НАГНЕТАНИЯ В ЖИДКОСТНОКОЛЬЦЕВЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСАХ

В.П.Литвиненко, И.А.Райзман, А.Е.Соколов

Транспортировка двухфазной смеси с каналом нагнетания в жидкостнокольцевых вакуумных насосах происходит за счет энергии сжатого газа. Выбор диаметра канала нагнетания, влияющего на энергетические параметры и металлоемкость насоса, имеет важное практическое значение.

В процессе исследования двухфазного течения в канале нагнетания ряда водокольцевых вакуумных насосов выяснилось, что поток сохраняет определенную структуру поверхности раздела фаз: пузырьковую, пробковую, дисперсно-кольцевую, дисперсную с переходными зонами между ними. При этом независимо от формы и размера канала дисперсно-кольцевая структура потока характеризуется минимумом потерь давления.

Режим минимума потерь давления в канале нагнетания жидкостнокольцевых вакуумных насосов можно описать соотношением безразмерных критериев

$$K = f(Fr, We, Ga),$$

где K, Fr, We, Ga – критерии, характеризующие взаимодействие сил, формирующих поверхность раздела фаз.

Решение эмпирических уравнений границ дисперсно-кольцевого режима относительно диаметра канала нагнетания позволяет при известных расходных параметрах определить диаметры канала, при которых двухфазный поток будет иметь промежуточную структуру верхней или нижней границы дисперсно-кольцевой структуры потока. При создании водокольцевых насосов ВВН1–1,5 и ВВН2–1,5 оказалось возможным уменьшить диаметр канала нагнетания с 65 до 40 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РОТАЦИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

И.С.Бодик, А.Ф.Сидоренко

Приводятся результаты экспериментальных работ по определению путей снижения удельной мощности и металлоемкости ротационного пластинчатого вакуумного насоса РВН-25, выпускаемого Сумским машиностроительным производственным объединением им. М.В.Фрунзе.

Излагаются результаты индицирования, выполненного с использованием автоматической системы записи и обработки информации. Особенностью системы является запись индикаторных диаграмм в цифровом коде на ферромагнитную ленту накопителя с последующей обработкой на ЭВМ.

На неподвижном корпусе расположены индуктивные датчики пульсирующих давлений типа ДМИ, работающие в комплекте с преобразователями типа УГ-В.

Проведенные исследования позволили разработать рекомендации по оптимизации всасывающего и нагнетательного трактов и повышению показателей насоса.

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОСТ НА БАЗЕ АГРЕГАТА АВР-50

О.Д.Пронин

Вакуумный испытательный пост на базе серийного агрегата АВР-50, снабженный высоковакуумной сорбционной ловушкой ЛЦ-60, предназначен для массовых испытаний узлов и деталей вакуумных систем.

Пост снабжен переключающим устройством, в котором поток воздуха, откачиваемого из испытываемого изделия при атмосферном давлении, автоматически перекрывает вход в сорбционную ловушку, чем защищает ее от быстрого насыщения и открывает обходной путь в форвакуумный насос 2НВР-5Д. С выходной стороны сорбционная ловушка защищена работающим двухроторным насосом ДВН-50.

Обходной трубопровод снабжен дросселирующей насадкой, площадь проходного сечения которой автоматически изменяется в зависимости от перепада давлений на ней.

При давлении порядка 3000 Па (≈ 23 торр) вход в сорбционную ловушку открывается, а обходной трубопровод перекрывается подпружиненным диском переключающего устройства.

Пост позволяет вести испытания изделий при давлении порядка $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па (10^{-4} торр).

РАЗРАБОТКА БЛОКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫХ НАСОСОВ

М.Д.Байков, Д.М.Вайсберг, Л.Б.Толмачев,
А.И.Толстихин

Приводом большинства турбомолекулярных насосов является трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Для питания электродвигателя применяют статические преобразователи частоты, которые обеспечивают оптимальный режим пуска и работы с точки зрения потребляемой мощности и времени выхода на режим.

Разработано несколько вариантов блоков питания турбомолекулярных насосов производительностью от 200 до 3500 л/с.

Основные технические данные разработанного ряда блоков питания приведены в таблице.

В блоке питания БП-2И7 использованы те же печатные платы, что и в блоке БП-1И7М. Это в значительной степени может облегчить освоение блока БП-2И7 в серийном производстве.

В блоках питания БП-226 и БП-24И также используются одинаковые платы. В отличие от блоков питания БП-1И7М и БП-2И7 в блоках БП-226 и БП-24И максимально исключены изделия, содержащие моточные данные, и полностью отсутствуют самодельные трансформаторы и дроссели.

Блоки питания обеспечивают частотный разгон двигателя ТМН и стабилизацию выходного напряжения и частоты в номинальном режиме. Защита блока питания от перегрузки обеспечивается автоматическим переходом в режим стабилизации тока и разрывом термоконтакта в случае длительной работы в пусковом режиме. Управле-

Блок питания	Насос	Масса, кг	Максимальная потребляемая мощность, кВА	Частота выходного напряжения, Гц	Выходное напряжение, В	Ток, А		Габаритные размеры, мм
						номинальный	пусковой	
БП-177М	ТМН-450 ТМН-1500	25	1,4	420 ± 5%	3 x 36	2,5	7	362x520x238
				370 ± 5%		3,5	8	
БП-217	ТМН-3500	37	2,6	250 ± 5%		7	19	464x520x238
БП-226	ТМН-200 ТМН-450 ТМН-1500	17	1,2	630 ± 2%		2,5	7	362x520x158
				420 ± 2%		2,5	7	
				370 ± 2%		3,5	8	
БП-241	ТМН-3500	30	2,6	250 ± 2%		7	19	464x520x238

ние блоками может осуществляться как с передней панели, так и дистанционно. Выводное управление и сигнализация позволяют встраивать блок в автоматическую систему управления технологическими процессами.

В настоящее время блок питания БП-177М используется совместно с турбомолекулярными насосами О1АБ-450-001, О1АБ-450-003, О1АБ-1500-002, О1АБ-1500-004 в технологических устройствах различного назначения. Блоки питания БП-177М взаимозаменяемы и не требуют индивидуальной настройки с насосом.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ-КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

С.Г.Аппель, Н.С.Лобанова

Наиболее распространенными единичными показателями надежности, характеризующими только одно свойство вакуумного оборудования, являются: по безотказности - интенсивность отказов (λ), по ремонтпригодности - среднее время восстановления (t_g), по долговечности - средний ресурс до капитального ремонта - $T_{с.р.к.р}$

Найдена аналитическая связь показателей надежности - критериев эффективности вакуумного оборудования. Установлено, что единичные показатели надежности математически связаны следующими функциональными зависимостями

$$T_{с.р.к.р} = \varphi(\lambda); \quad t_g = f(\lambda).$$

Согласно разработанному с участием авторов ОСТ 26-04-2390-79, средний ресурс до капитального ремонта определяется по формуле

$$T_{с.р.к.р} = A \frac{1}{\lambda_0 - \sum_{z=1}^K \lambda_{3z}},$$

где A - ожидаемое количество плановых ремонтов в течение среднего ресурса до капитального ремонта изделия; λ_0 - интенсивность отказов изделия, 1/ч; λ_{3z} - интенсивность отказов заменяемого или восстанавливаемого небазового элемента, предопределяющего надежность изделия. Стоимость и трудоемкость замены или восстановления этого элемента составляет не более 10% от лимитной цены изделия, 1/ч:

K – число заменяемых или восстанавливаемых небазовых элементов. Численное значение K составляет не более 10% общего числа небазовых элементов, комплектующих изделие.

По данным формуляров надежности и опросных анкет потребителей вакуумного оборудования, количество которых соответственно составило 135 и 127 шт., определены зависимости времени восстановления изделия от интенсивности отказов и коэффициента готовности K_r от интенсивности отказов, которые выражаются для изделий в целом параболической кривой вида

$$t_g = A\lambda^2 + B\lambda + C; \quad K_r = A'\lambda^2 + B'\lambda + C,$$

а в составе изделия для комплектующих механических и электрических элементов – степенной функцией

$$t_g = a\lambda^b + C; \quad K_r = a_1\lambda^b + C_1.$$

Расхождение между статистически заданными функциями и отражающими эти функции эмпирическими формулами не превышает 6%.

Установлено, что с повышением сложности изделия ($\lambda \leq 1000 \cdot 10^{-6}$, 1/ч) его наработка на отказ снижается, а среднее время восстановления и ресурс до капитального ремонта возрастают. В более сложных изделиях ($\lambda > 1000 \cdot 10^{-6}$, 1/ч) среднее время восстановления и наработка на отказ снижаются. Это объясняется тем, что в менее сложных изделиях восстановление элементов в составе изделий происходит путем ремонта, а в более сложных изделиях путем замены. Проведенная работа позволяет по одному из единичных показателей надежности (безотказности) определять все другие единичные показатели. Используя представленную взаимосвязь показателей надежности, можно повысить эффективность изделий за счет повышения их ремонтпригодности, что может быть достигнуто путем разработки блочной разборной конструкции изделия.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ БАРАБАНЫХ РЕШЕТОК

Ю.М.Тузанкин

Задача расчета барабанной решетки турбомолекулярного насоса состоит в определении наружного диаметра решетки, длины и ко-

личества рабочих каналов при их известной геометрии и окружной скорости из условия обеспечения заданной быстроты действия.

Барабанная решетка представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку, в которой параллельно оси вращения прорезаны длинные щелевые каналы, лопатки между которыми связаны кольцевыми бандажми.

Если следовать методике, основанной на обеспечении необходимой прочности решетки, то в отличие от дисковой в барабанной решетке от действия центробежных сил лопатки работают на изгиб, а бандаж – на растяжение, поэтому размеры решетки должны определяться из условия прочности лопатки и бандаж.

Бандаж рассматривается как кольцо, нагруженное равномерно распределенной нагрузкой от центробежных сил массы самого бандаж и массы лопатки

$$q_p = \frac{\gamma v^2 (1 - \mu^2)}{2g} \left(l_p - \frac{\varphi_0 z l_\lambda}{2\pi} \right), \quad (1)$$

где γ – плотность материала; μ – отношение внутреннего радиуса R_2 к наружному R_1 ; z – количество каналов (лопаток); $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $l_p, l_\lambda, \varphi_0$ – размеры элементов решетки.

Зная нагрузку на бандаж и его сечение, получим сначала напряжение от растяжения

$$\sigma = \frac{q_p (1 - \mu)}{2l\sigma(1 - \mu)}, \quad (2)$$

а затем, решая уравнение (2) относительно z , получим

$$z = \frac{2\pi}{\varphi_0 (1 - \lambda)} \left[1 - \frac{\lambda}{\beta (1 + \mu)^2} \right], \quad (3)$$

где $B = \frac{K\gamma v^2}{4q\sigma_r}$ – комплекс величин, постоянных для выбранного материала с пределом текучести σ_r , заданного запаса прочности K и фиксированной окружной скорости v .

Лопатка рассматривается как балка, свободно опертая по концам и нагруженная центробежной силой от массы лопатки.

Максимальное напряжение изгиба для сечения лопатки, упрощенного до параллелограмма

$$\sigma_\lambda = \frac{3\gamma v^2 (1 + \mu) l_\lambda^2}{8R_1^2 (1 - \mu)}. \quad (4)$$

Решая уравнение (4) относительно длины лопатки с учетом коэффициента запаса прочности K , получим

$$l_A = R_1 \sqrt{B_1 \frac{1-\mu}{1+\mu}}, \quad (5)$$

где $B_1 = \frac{8\delta_T}{3v^2 K}$ — комплекс величин, постоянных для фиксированных K, v, δ_T .

По известным величинам z и l_A определяется суммарная площадь входа в каналы

$$F_{gx} = z \varphi_0 R_1 l_A, \quad (6)$$

а затем, используя уравнение максимальной скорости действия,

$$S_{max} = F_{gx} v (P_{12} - P_{21} \varepsilon), \quad (7)$$

определяем радиус решетки R_1 ,

$$R_1 = \frac{S_{max}}{\frac{2\pi}{1-\lambda} \left[1 - \frac{\lambda}{B(1+\mu)^2} \right] v (P_{12} - P_{21} \varepsilon) \sqrt{B_1 \frac{1-\mu}{1+\mu}}} \quad (8)$$

и длину канала l_A

$$l_A = \left[\frac{S_{max} \sqrt{B_1 \frac{1-\mu}{1+\mu}}}{\frac{2\pi}{1-\lambda} \left[1 - \frac{\lambda}{(1+\mu)^2} \right] v (P_{12} - P_{21} \varepsilon)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

где $(P_{12} - P_{21} \varepsilon)$ — результирующая вероятность перехода молекул через канал; ε — отношение площадей входов для каналов переменного сечения;

v — падающий объем газа на 1 см^2 .

Согласно уравнениям (6), (7) радиус решетки R_1 , длина лопаток l_A и количество каналов z зависят от величин λ, μ и результирующей вероятности перехода молекул $(P_{12} - P_{21} \varepsilon)$, которая в свою очередь есть функция геометрии и скорости каналов.

Изменяя величины λ и μ , можно осуществлять подбор удобных для конструирования размеров решетки при сохранении их прочности и скорости действия.

ДИФФУЗИОННЫЕ ПАРОМАСЛЯНЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ОТКАЧКИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

М.А.Бережковский, К.М.Москаленко, А.Э.Рафальсон, Б.Н.Соколов, А.И.Холодов

Основными параметрами диффузионных насосов, определяющими их пригодность для откачки аналитических приборов, являются предельное остаточное давление, стабильность скорости действия, а также обратный поток паров рабочей жидкости.

Сравнение конструкции и рабочих характеристик отечественных и современных зарубежных диффузионных паромасляных насосов дает возможность выявить те причины, которые не позволяют достаточно широко применять отечественные паромасляные насосы в современных аналитических приборах, а именно:

большой обратный поток паров рабочей жидкости, обусловленный прежде всего конструкцией и технологией изготовления насосов;

недостаточная стабильность скорости действия насосов, что особенно опасно для откачки сочетания хроматографа (с большим потоком гелия) с масс-спектрометром;

большой разброс параметров насосов из-за несовершенства конструкции и недостаточной точности изготовления и сборки основных элементов насоса (особенно сопел и паропроводов).

Анализ теоретических положений, описывающих работу насосов, позволяет сделать следующие заключения.

1. Поскольку скорость действия прямо пропорциональна площади кольцевого зазора между наружным диаметром сопла верхней ступени и внутренним диаметром корпуса насоса в сечении верхней ступени, этот зазор целесообразно увеличивать за счет диаметра сопла верхней ступени и диаметра корпуса насоса.

2. Скорость действия насоса зависит от параметров струи, т.е. ее плотности, скорости, давления и температуры пара. Поэтому всякие нарушения структуры струи, вызванные изменением геометрии струеобразующих поверхностей как за счет неточного изготовления, так и вследствие недостаточной чистоты обработки, приводят не только к уменьшению скорости действия по величине, но и к появлению ее флуктуаций. Эти же нарушения структуры струи

одновременно являются причиной образования в струе молекул пара, имеющих скорости, направленные в сторону, противоположную откачке. Такие молекулы, не принимая участия в захвате и переносе молекул откачиваемых газов, приводят к уменьшению скорости действия, одновременно создавая обратный поток паров рабочей жидкости в откачиваемый объем.

В настоящее время отечественная промышленность не выпускает паромасляные насосы для откачки аналитических приборов, поэтому СКБ АП НТО АН СССР разработало техническую документацию на диффузионные насосы, которые имеют без применения вымораживающих ловушек следующие рабочие характеристики: быстрота действия в диапазоне давлений 10^{-3} – 10^{-5} Па – 0,1 и 0,7 м³/с соответственно, предельное остаточное давление менее $5 \cdot 10^{-6}$ Па, максимальное допустимое форвакуумное давление ≈ 10 Па.

На базе этих насосов разработаны системы откачки масс-спектрометров для химических исследований. Испытание систем откачки производилось на масс-спектрометре МХ1320 с одинарной фокусировкой. Длительность испытаний 280 дней.

Проведенные испытания позволяют сделать следующие выводы.

1. Применение приведенной выше системы откачки позволило обеспечить паспортные значения основных рабочих характеристик масс-спектрометра МХ1320.

2. В остаточном масс-спектре за все время испытаний не было зарегистрировано роста характеристических линий полифенилового эфира 5Ф4Э.

3. Испытания подтвердили высокую химическую и термическую стабильность полифенилового эфира в рабочих условиях насосов.

О ВЛИЯНИИ КОНДЕНСАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЖЕКТОРНЫХ СТУПЕНЕЙ ПАРОМАСЛЯНЫХ НАСОСОВ

К.С.Садыков

Рассматривается эжекторная ступень с цилиндрической камерой смешения со сверхзвуковым подводом рабочего пара через центральное сопло. Рассматриваются режимы запираания эжектора. Предполагается, что течение установившееся; в камере смешения часть пара конденсируется, причем конденсация происходит только на

стенках камеры смешения; стенки сопл нетеплопроводны; в камере смешения откачиваемый газ и несконденсировавшаяся часть пара полностью перемешивается, процесс смешения механический; на входе в камеру смешения пар и газ термически и калорически совершенны.

Течение в эжекторе рассматривается в одномерной постановке. Вместо неравномерных потоков (рабочего пара, откачиваемого газа и смеси) вводятся эквивалентные им одномерные канонические потоки. Расчетные соотношения включают члены, учитывающие конденсацию рабочего пара.

Рассчитываются характеристики эжектора при заданных значениях давления и температуры торможения рабочего пара, расхода откачиваемого газа, коэффициента конденсации, геометрических размерах эжектора, термодинамических свойствах рабочего пара и откачиваемого газа.

Расчет проводился для случая, когда откачиваемым газом являлся воздух, рабочей жидкостью – вакуумное масло ВМ-1. Значения коэффициента конденсации менялись от 0 до 1.

Приводятся результаты расчетов, из которых видно, что с повышением значения коэффициента конденсации значения степени сжатия, быстроты откачки и выходного давления уменьшаются. При полной конденсации пара в камере смешения быстрота откачки составляет 94,7% от номинальной (при отсутствии конденсации), степень сжатия и выходное давление – соответственно 16,7 и 17,6%.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ НА НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРОМАСЛЯНЫХ НАСОСОВ

В.А.Мильграм, Т.И.Усманов, Д.Х.Зайденштейн

Излагаются результаты исследования распределения параметров по паропроводу и корпусу паромасляного насоса. Рассматриваются схема установки и методика проведения исследований.

Получено распределение температур по стенке корпуса паромасляного насоса, по дну кипятыльника (внутри и снаружи), в керамическом корпусе нагревателя, в рабочей жидкости, а также температура паров рабочей жидкости над ее поверхностью и на входе в сопла при различных величинах подводимой мощности и расхо-

да охлаждающей воды.

Приводятся характеристики скорости действия, наибольшего выпускного давления и предельного давления срыва по ступеням паропровода при различных тепловых режимах.

Получены величины полного давления паров рабочей жидкости над ее поверхностью при различных значениях подводимой мощности. Рассмотрены режимы течения в паропровode и определено состояние паров на входе в сопла. Получены кривые упругости паров фракций рабочей жидкости в различных частях кипятильника.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В СОПЛАХ ЭЖЕКТОРНЫХ СТУПЕНЕЙ ПАРОМАСЛЯНЫХ НАСОСОВ

К.С. Садыков, В.Г.Жаринов

Исследовалось течение паров вакуумного масла ВМ-1 в конических осесимметричных соплах Лавала на режимах недорасширения.

Исследования проводили на установке, созданной на базе серийно выпускаемого диффузионного насоса с условным проходом 400 мм. Установка состоит из одноступенчатого эжекторного насоса, насоса предварительной откачки, координатника со сменными приемниками давления и измерительного колпака.

При проведении исследований измеряли параметры пара на входе в сопло (давление, температуру, степень сухости), изучалось распределение полных давлений на срезе сопла и определялся расход пара через сопло.

Измерение степени сухости осуществлялось электрическим калориметром. Кроме контроля степени сухости калориметр при необходимости позволял и перегревать пар.

Давление измерялось при помощи трубок Пито и вакуумметра ВДГ-1. Трубки Пито были изготовлены из нержавеющей стали и представляли собой цилиндры с плоским торцом, внешний диаметр которых составлял 8 мм. Числа Рейнольдса, определенные по параметрам невозмущенного потока и по диаметру зонда, во всех рассмотренных случаях составили $Re > 200$.

Расход пара через сопла определяли по количеству конденсата, образованного на стенках камеры смешения. Для предотвращения утечки пара из камеры смешения пассивное сопло эжектора заглу-

щалось, а на выходе из него был установлен охлаждаемый маслоотбойник.

Сопла были рассчитаны в одномерной постановке. Все исследованные сопла геометрически подобны.

По результатам экспериментальных исследований получены поля полных давлений в сечениях выхода сопел. Толщины пограничных слоев в исследованных случаях составили $\delta = (0,37 \pm 0,74)r$ (r - радиус выходного сечения сопла).

Из сравнения расхода, подсчитанного в одномерной постановке по параметрам пара на входе в сопло и определенного из эксперимента, получены значения коэффициентов расхода сопел.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДИФфуЗИОННОГО ПАРОМАСЛЯНОГО НАСОСА Н-100/350 НА ПРЕДЕЛЬНОЕ ОСТАТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО ФЛУКТУАЦИИ

В.А.Алексеев

Проведено масс-спектрометрическое исследование по выявлению факторов, влияющих на предельное остаточное давление и его флуктуации при работе насоса на маслах ВМ-1, ВМ-5, Ф43.

Изучалось влияние конструкций высоковакуумного фланцевого соединения, эжекторной ступени, колпака маслоотражателя и корпуса насоса, их охлаждения, изменения мощности электронагревателя и шероховатости поверхности высоковакуумного сопла на предельное давление и его флуктуации.

Установлено, что флуктуации предельного остаточного давления вызваны противодиффузией водорода из элементов конструкции, находящихся в области кипятильника. Флуктуации давления можно уменьшить в 5-10 раз, дегазировав (после мойки) нижнюю половину корпуса насоса прогревом до 150°C под откачкой на ВОП до давления не более $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па.

Кроме того, предельное остаточное давление, время его получения, а также обратный поток паров рабочей жидкости в основном обусловлены недостаточным охлаждением колпака маслоотражателя и корпуса насоса, малым количеством диффузионных сопел и степенью обезгаженности рабочей жидкости и конструкции насоса.

ПАРОМАСЛЯНЫЕ ВЫСОКОВАКУУМНЫЕ АГРЕГАТЫ ТИПА АВП

Н.М.Гумеров, И.Ф.Шмелев, Р.С.Валеев, И.И.Ху-
зиханов

Начато серийное производство высоковакуумных паромасляных агрегатов АВП 100-100, АВП 160-250, АВП 250-630, АВП 400-1600 и АВП 630-4000. Новый ряд агрегатов создан в соответствии с планом внедрения (ГОСТ 18626-73) взамен выпускавшихся ранее агрегатов ВА-01-1 Пр. АВП-0,5, АВП-2, АВП-5, АВП-8.

Первая цифра в обозначении новых агрегатов определяет диаметр условного прохода входного отверстия агрегата, вторая цифра условно обозначает быстроту действия агрегата.

Основные технические данные агрегатов приведены в таблице.

В состав агрегатов входят паромасляные диффузионные насосы серии Н, охлаждаемые жидким азотом высоковакуумные ловушки заливного типа серии ЛА, шиберные затворы маятникового типа с электромеханическим приводом серии ЗВЭ, дистанционный щит управления, питающее устройство ПА-1 и рама для монтажа составных частей агрегата.

Существенные отличия агрегатов по сравнению с заменяемыми заключаются в следующем.

Охлаждение корпуса паромасляного насоса производится посредством навитой и припаянной к корпусу медной трубки вместо рубашки. Такое решение позволяет предотвратить коррозию корпуса насоса.

Ловушки заливного типа по сравнению с проточными позволяют значительно сократить расход жидкого азота, уменьшить на порядок вылет масла в откачиваемый объем.

Шиберные затворы типа ЗВЭ по сравнению с угловыми типа У обладают повышенной проводимостью, меньшим строительным размером.

По сравнению с ранее выпускавшимися агрегатами новый ряд имеет лучшие удельные характеристики.

Параметр	Шифр агрегата				
	АВП100-100	АВП160-250	АВП250-630	АВП400-1600	АВП630-4000
Быстрота действия в диапазоне давлений $1,3 \cdot 10^{-3} \pm 10^{-1}$ Па, л/с	100	250	700	1800	5000
Предельное остаточное давление при температуре окружающей среды $20 \pm 5^\circ\text{C}$, Па	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Наибольшее выпускное давление, Па	26,6	33	26,6	26,6	26,6
Расход жидкого азота в установившемся режиме при давлении $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па, л/ч	0,8	0,8	1,0	2,0	6,5
Потребляемая мощность, кВт	0,5	0,9	2,1	5,1	9,25
Расход охлаждающей воды, л/ч	35	72	150	200	600
Высота, мм	645	680	1085	1440	2000
Длина, мм	560	580	767	1100	1900
Ширина, мм	400	440	690	930	1400
Масса, кг	42	72	150	340	900

Примечание. Габаритные размеры и масса приведены без учета переносного щита управления.

Экономический эффект от внедрения агрегатов, определенный по объему серийного производства, составляет более 7 млн. руб.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ ЭЖЕКТОРА

В.К.Сарбаев

С целью дальнейшего совершенствования методов расчета жидкостных и газовых струйных аппаратов проведено теоретическое исследование распределения параметров в камере смешения эжектора.

Жидкостные эжекторы. Пусть в начальном сечении жидкостного эжектора задано распределение скорости смешивающихся потоков, имеющих одинаковые давления и плотности. Требуется определить течение вниз по потоку и форму изобарической камеры смешения. Для описания течения в эжекторе применяются уравнения пограничного слоя, которые в переменных Мизеса x, ψ (x - продольная координата, ψ - функция тока) сводятся к следующему:

$$u_x = \rho^2 [E u u_\psi]_\psi, \quad u = u(x, \psi), \quad 0 \leq \psi \leq \psi_0, \quad x > 0, \quad (I)$$

где u - скорость; u_x, u_ψ - частные производные по x, ψ ; ρ - плотность; $\psi = \int_0^y \rho u dy$; y - поперечная координата.

Полагается $E = E_s + E_\tau$, $E_s = \mu$, μ - вязкость, $E_\tau = A(x)(u|u_\psi|)^\alpha$. Например, при $A = \rho c^2 x^2$, $\alpha = 1$ для турбулентного трения E_τ получается старая формула Прандтля, в случае $A = \kappa x (u_{max} - u_{min})$, $\alpha = 0$ - новая формула Прандтля (κ, κ - эмпирические постоянные). Случай $A = 0$ соответствует ламинарному течению. Пограничным слоем на стенке камеры смешения пренебрегают.

Краевые условия имеют вид

$$u(0, \psi) = u_0(\psi) > 0, \quad 0 \leq \psi \leq \psi_0, \quad u_\psi(x, 0) = u_\psi(x, \psi_0) = 0, \quad x > 0. \quad (2)$$

Уравнение движения (I) является частным случаем более общего уравнения

$$u_x = \kappa_\psi(x, s), \quad s = \varphi(u), \quad (3)$$

где $\kappa(x, s)$, $\varphi(u)$ - ограниченные функции, имеющие положительные ограниченные производные $\kappa_s(x, s)$, $\varphi_u(u)$ при ограниченных x, s, u . Уравнение (I) соответствует случаю $\kappa(x, s) = \rho^2 s [A|s|^\alpha + \mu]$, $\varphi(u) = u^2/2$.

Краевая задача (3), (2) решается методом сеток. Строится явная разностная схема.

Доказывается, что разностная схема сходится. Идея доказательства основана на введении вспомогательной функции. Предлагаемым методом проведены расчеты поля скорости в изобарической камере смешения жидкостного эжектора и определена его форма из соотношения $y_{zp} = h \sum_{i=0}^N (\tilde{u}_m^i)^{-1}$.

Газовые эжекторы. В газовом эжекторе происходит смешение активного потока, истекающего из сопла, с пассивным спутным потоком (газы могут быть различными по составу). Потоки в начальном сечении равномерные, параметры заданы. Течение изобарическое. Рассматривается начальный участок, на котором границы зоны смешения $y_1(x)$, $y_2(x)$ еще не достигли ни стенки эжектора, ни его оси. Требуется определить параметры течения на начальном участке, а также форму канала, обеспечивающего изобаричность процесса смешения.

Для определения границ зоны смешения и параметров внутри нее используются результаты работы Сарбаева В.К. и Жаринова В.Г. Аналитические решения автомодельных задач о плоских турбулентных струях газов переменного состава. - Инж.-физ.ж., 1979, т. 37, № 5, с. 798-803.

Форма начального участка камеры смешения $y_{zp}(x)$ определяется из условия сохранения расхода ($i=0$ - плоское течение, $i=1$ - осесимметричное)

$$\int_0^{y_1} \rho_0 u_0 y^i dy + \int_{y_1}^{y_2} \rho u u y^i dy + \int_{y_2}^{y_{zp}} \rho_n u_n y^i dy = \int_0^d \rho_0 u_0 y^i dy + \int_d^{y_{zp}} \rho_n u_n y^i dy.$$

В результате ряда преобразований для плоского эжектора получается следующая формула:

$$y_{zp} = D + ax(\xi_1/\kappa M - \xi_2 - bJ_1/\kappa M), \quad \kappa = \rho_0/\rho_n, \quad M = u_0/u_n, \quad b = \xi_1 - \xi_2.$$

Значения ξ_1, ξ_2 определяют границы изменения автомодельной переменной $\xi = (d-y)/ax$, a - эмпирическая постоянная ($a \approx 0,1$), так, что $y_1 = d - \xi_1 ax$, $y_2 = d - \xi_2 ax$, $J_1 = \int_0^1 v \bar{u} d\eta$, $v = \rho/\rho_0$, $\bar{u} = u/u_0$, $\eta = \frac{\xi_1 - \xi_2}{b}$.

Решается и обратная задача по определению входного размера эжектора D при заданной конусности камеры смешения.

Форма начального участка осесимметричного эжектора описывается кривой второго порядка $y_w = \sqrt{D^2 + c_1 dax + c_2 (ax)^2}$, $c_1 = (2\xi_1 - 2\kappa M \xi_2 - bJ_1)/\kappa M$, $c_2 = (\kappa M \xi_2^2 - \xi_1^2 + bJ_2)/\kappa M$, $J_2 = \int_0^1 \tilde{u} \cdot (\xi_2 + b\eta) d\eta$. В случае $c_2 = 0$ получается парабола, $c_2 < 0$ — эллипс, $c_2 > 0$ — гипербола.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ТЕОРИИ ЭЖЕКТРОВ

В.Г.Жаринов, В.К.Сарбаев

Детальное описание процессов, происходящих в камере смешения сверхзвукового эжектора, является довольно сложной задачей, поэтому большое значение приобретают интегральные методы расчета, которые, не описывая внутреннюю структуру течения, все же позволяют установить связь между параметрами в различных сечениях эжектора.

Рассматривается сверхзвуковой эжектор с конической камерой смешения, работающий на предельном режиме, когда скорость течения в начальном сечении горла диффузора (в сечении 2) звуковая или сверхзвуковая, причем переход к дозвуковой скорости заканчивается до выходного сечения горла диффузора (до сечения 3). Течение адиабатическое. Активной средой является водяной пар, а пассивной — совершенный газ. Параметры потоков в сечении, совпадающем со срезом сопла (в сечении 1), известны. Геометрические размеры эжектора заданы. Требуется определить параметры на выходе из эжектора (в сечении 4).

Два параметра на выходе из эжектора известны: расход G_4 ($G = \rho w F$, ρ — плотность, w — скорость, F — площадь) и поток энтальпии J_{o4} ($J_o = i_o G$, i_o — удельная энтальпия торможения). Поток в сечении 4 можно считать одномерным, поэтому достаточно определить еще один независимый параметр, например, удельную энтропию S_4 . $S_4 = S_3 \cdot v_{34}$. Величина S_3 вычисляется по соотношениям для одномерного течения с помощью G_3 , J_{o3} , U_3 (U — полный импульс, $U = pF + Gw$, p — давление). Из условия сохранения количества движения на участке 2-3 $U_3 = U_2 - \Phi_{23}$. Сила трения потока о стенку горла диффузора Φ_{23} определяется по формуле $\Phi_{23} = \zeta l_{23} G w_{23} / 2d_2$, $w_{23} = (w_2 + w_3)/2$, ζ — коэффициент трения, l_{23} , d_2 — длина и диаметр горла диффузора.

Итак, для решения поставленной задачи достаточно знать величину U_2 , которая определяется одним из двух способов. Пер-

вая расчетная модель основана на использовании коэффициента потерь v_{12} в сужающейся части диффузора, так, что $\tilde{S}_2 = S_1 v_{12}$ (\tilde{S}_2 — некоторое условное значение потока энтропии $S = sG$), равное по величине энтропии сверхзвукового одномерного потока, характеризующегося расходом G_2 , потоком энтальпии J_{o2} , полным импульсом U_2 и площадью поперечного сечения F_2 . Знание величины \tilde{S}_2 дает возможность простого определения U_2 . Анализ показывает, что коэффициент v_{12} достаточно знать лишь приближенно.

Вторая расчетная модель основана на использовании уравнения количества движения и для участка 1-2: $U_2 = U_1 - \tilde{R} - \tilde{\Phi}_{12}$ ($\tilde{R} = (F_1 - F_2)(p_1 - \tilde{p}_2)/2$ — реакция стенки для случая линейного по площади изменения p от давления пассивного потока в сечении 1 p_1 до давления \tilde{p}_2 некоторого одномерного потока, имеющего параметры G, J_o, U_2, F_2 ; $\tilde{\Phi}_{12} = \Phi_{12} + (R - \tilde{R})$; Φ_{12} — сила трения на участке 1-2, R — действительная величина реакции стенки). Полагается $\tilde{\Phi}_{12} = \zeta l_{12} G (w_1 + \tilde{w}_2)/2(d_1 + d_2)$, w_1 — скорость пассивного потока, w_2 — скорость одномерного потока с параметрами G, J_o, U_2, F_2 , l_{12} — длина сужающейся части диффузора, d_1, d_2 — диаметры сечений 1, 2. Величина определяется из сравнения расчетов с экспериментальными данными. Величина ζ найдена для широкого диапазона изменения давления p_1 .

При нахождении параметров смеси в сечениях 2, 3, 4 предполагается, что компоненты находятся в состоянии термодинамического равновесия. В любом сечении из условий сохранения массы и энергии выражается величина скорости через температуру и интегральные характеристики. Программа расчетов на ЭВМ составлена таким образом, что при каждом значении температуры определяется состояние водяного пара в смеси. Для этого рассчитывается по соотношениям, справедливым для влажного пара, величина степени сухости: если $x \leq 1$ — пар влажный, $x > 1$ — перегретый.

ОБ ОДНОЙ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ В ТЕОРИИ ЭЖЕКТРОВ

Р.А.Рахимзянов

При разработке эжекторов обычно возникают следующие две экстремальные задачи: I) заданы отношения начальных давлений, эн-

ВЛИЯНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ТЕЧЕНИЕ В СОПЛЕ
ПАРОВОДЯНОГО ЭЖЕКТОРНОГО НАСОСА
Р.А.Рахимзянов

тальпий торможения высоконапорного газа к низконапорному δ, θ , коэффициент эжекции K_0 ; требуется отыскать эжектор с максимальной степенью сжатия ε_m (первая задача); 2) заданы δ, θ , степень сжатия ε_0 ; требуется отыскать эжектор с максимальным коэффициентом эжекции K_m (вторая задача). В данной работе рассматривается вторая задача для эжекторов с цилиндрической камерой смещения на критических режимах работы. Из сверхзвукового сопла истекает влажный пар, а эжектируется перегретый пар того же вещества.

Между первой и второй задачами существует связь. Рассмотрим первую задачу. Система уравнений эжектора имеет вид

$$\Phi_i(\kappa_0, \varepsilon, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (1)$$

Она определяет $\varepsilon, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$ как неявные функции аргумента x_n . Задача сводится к отысканию максимума функции $\varepsilon(x_n)$. Из необходимого условия экстремума $d\varepsilon/dx_n = 0$ следует равенство нулю якобиана

$$\det \left| \frac{\partial \Phi_i(\kappa_0, \varepsilon, x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_j} \right| = 0 \quad (i, j = \overline{1, n}). \quad (2)$$

Уравнения (1), (2) определяют стационарные точки, пусть в точке $(\varepsilon_m, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ достигается максимум.

Для тех же δ, θ и найденного ε_m ставим вторую задачу. Теперь требуется найти максимум функции $\kappa(x_n)$. Уравнения, определяющие стационарные точки, будут

$$\Phi_i(\kappa, \varepsilon_m, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad \det \left| \frac{\partial \Phi_i(\kappa, \varepsilon_m, x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_j} \right| = 0, \quad (i, j = \overline{1, n}). \quad (3)$$

Из сравнения (3) с (1) и (2) видно, что $(\kappa_0, \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ есть решение системы (3), т.е. точка максимума первой задачи будет являться стационарной для второй задачи. Это позволяет предположить, что именно в ней и достигается максимум:

$\max \kappa(x_n) = \kappa_0$. Численные эксперименты по данным Ю.Н.Васильева подтвердили сказанное.

Изложенное показывает, что при одинаковых δ, θ , если $\varepsilon_0 = \varepsilon_m$, то $K_m = K_0$, иными словами, решение первой задачи есть решение второй, если соответствующие данные совпадают. Обратное тоже справедливо.

Течение при низких давлениях и больших степенях расширения, характерное для рабочих сопел пароводяных эжекторных насосов, сопровождается значительным ростом пограничного слоя и уменьшением однородного ядра потока. Пограничный слой существенным образом влияет на течение в сопле: изменяется распределение параметров потока, возникают потери, обусловленные торможением сил вязкости. Расчет сопла в таких условиях следует проводить с учетом влияния пограничного слоя.

Рассматривается течение влажного водяного пара в сверхзвуковом коническом сопле с учетом влияния вязкости. Область течения разбивается на однородное изэнтропическое ядро, где отсутствуют силы вязкости, и ламинарный пограничный слой, который состоит из двух подслоев: верхнего двухфазного и нижнего (прилегающего к стенке) однофазного - перегретого пара. С помощью найденного преобразования переменных исходная система уравнений в сферических координатах для осесимметричного течения сводится к исследованному ранее плоскому случаю течения. Анализ изменения параметров в изэнтропическом ядре показал, что для определения профилей скорости, плотности можно применить локально-автомодельный метод расчета. Распределение давления в сопле определяется последовательными приближениями из условия сохранения расхода. Представлены результаты расчетов в широком диапазоне чисел Рейнольдса и Маха (вплоть до режимов течения со скольжением).

Содержание

I СЕКЦИЯ	Стр.
Выбор граничных условий для диффузионной модели процессов переноса в зазоре	3
Молекулярная проводимость системы плоских перфорированных экранов	5
Кинетическое описание течения разреженного газа через модельное пористое тело	6
О влиянии процесса конденсации на поглощение молекул примесного газа	7
Моделирование тепловых процессов в вакуумных магнитожидкостных уплотнениях	10
Исследование адсорбционных и теплофизических характеристик пористых материалов в широком диапазоне температур и давлений	12
Влияние вакуума на физико-химические процессы, протекающие в зоне фрикционного контакта при работе узлов трения в режиме избирательного переноса	12
Исследование методов подготовки к работе вакуумных камер после контакта с атмосферным воздухом	14
Теоретическое и экспериментальное исследование распределения концентраций молекул в вакуумных камерах с откачкой	15
Расчет газовых потоков в высоковакуумных электро-термических установках с применением ЭВМ	16
Тепло- и массоперенос в процессе замерзания капли в вакууме	17
Влияние параметров режима вакуумного испарения на свойства конденсатов алюминия и серебра	18
Исследование процесса термовакuumной сушки металлических изделий перед контролем герметичности	20
Получение пленок тугоплавких металлов в сверхвысоком вакууме, создаваемом криогенными средствами откачки	21

Создание и длительное поддержание вакуума в криогенных емкостях с вакуумно-многослойной изоляцией	22
Исследование газоотделения материалов непрогреваемых вакуумных систем в диффузионном и десорбционном режимах	24
Новые возможности получения тонких пленок в вакууме с использованием длиннофокусных электронных пушек мощностью 15 и 100 кВт	26
Исследование процессов в орбитронной системе в связи с составом остаточной среды и предельным давлением	28
Экспериментальное исследование тлеющего разряда в потоке разреженных газов	29
Влияние термического сопротивления зазора на интенсивность сублимационного обезвоживания	30
Импульсная фотодесорбция и ее применение в физике вакуума и вакуумной технике	31
О времени адсорбции в высоком вакууме молекул воды на поверхности стекла после облучения ее светом импульсных ламп	32
Изменение поверхностных свойств материалов после их облучения в вакууме мощными импульсными лампами	34
Расчет радиального насоса с барабанными решетками методом статистических испытаний	35
 II СЕКЦИЯ	
Исследование перспективности винтовой схемы маслозаполненного форвакуумного насоса высокой производительности	37
Исследование маслозаполненного пластинчато-роторного вакуумного насоса	37
Исследование модели двухроторного винтового вакуумного насоса	38
К вопросу выбора диаметра канала нагнетания в жидкостнокольцевых вакуумных насосах	39

Результаты исследований ротационного вакуумного насоса	40
Полуавтоматический испытательный пост на базе агрегата АВР-50	40
Разработка блоков питания для турбомолекулярных насосов	41
Аналитическое выражение взаимосвязи показателей надежности - критериев эффективности изделий	43
Методика определения основных размеров барабанных решеток	44
Диффузионные паромасляные насосы для откачки аналитических приборов	47
О влиянии конденсации на характеристики эжекторных ступеней паромасляных насосов	48
Экспериментальные исследования влияния тепловых режимов на некоторые характеристики паромасляных насосов	49
Экспериментальное исследование течения в соплах эжекторных ступеней паромасляных насосов	50
Экспериментальное исследование влияния конструкции диффузионного паромасляного насоса Н-100/350 на предельное остаточное давление и его флуктуации	51
Паромасляные высоковакуумные агрегаты типа АВП	52
Исследование распределения параметров в камере смещения эжектора	54
Интегральные соотношения в теории эжекторов	56
Об одной экстремальной задаче в теории эжекторов	57
Влияние пограничного слоя на течение в сопле пароводяного эжекторного насоса	59

Корректор Г.А.Уранова

Подл. в печ. 4/ХП-80 г.	Т-18492..	Усл. печ. л. 3,875	Уч.-изд. л. 3,12.
Тираж 300 экз.	Заказ 3950/7073.	Формат 60х90 1/16.	Бесплатно.

ПМБ ЦИНТИхимнефтемаша, 119048, Москва, Г-48, ул. Доватора, 12