

М1337931

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Николай Николаевич Тарасов

Исследование неустановившихся процессов при вакуумиро-
вании теплозащитных полостей протяжённых криогенных
магистралей с вакуумно-многослойной изоляцией

(05.04.06. - Вакуумная и компрессорная техника)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 1979

Работа выполнена в Балашихинском ордена Ленина научно-производственном объединении криогенного машиностроения им. 40-летия Октября.

Научный руководитель -

кандидат технических наук, с.н.с. Филин Н.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Кошмаров Д.А.

кандидат технических наук, доцент Минайчев В.Е.

Ведущее предприятие указано в решении Учёного Совета.

Автореферат разослан " " "

1979 г.

Защита диссертации состоится " " " 1979 г. на

заседании специализированного Совета К.053.15.07 МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, Лефортовская наб., дом I, корпус факультета "Энергомашиностроение".

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.Н.Э.Баумана.

У

Н.Козлов

M337931

НТБ МВТУ им. Н.Э.Баумана



1337931

Тарасов Н.Н. Исследование

Актуальность проблемы. Доставка к потребителю криогенных продуктов, которые широко применяются как в промышленности, так и в научных исследованиях, часто осуществляется с помощью протяженных криогенных магистралей. В последние годы ведутся работы по созданию систем криогенного обеспечения сверхпроводящих линий электропередач и ускорителей на сверхпроводящих магнитах, в которых жидкий гелий должен передаваться на расстояния в несколько десятков километров. В таких магистралах предъявляются высокие требования к тепловой защите. Вакуумно-многослойная теплоизоляция обеспечивает необходимый уровень теплопритоков, однако эффективность её существенно зависит от давления остаточного газа в теплозащитной полости перед охлаждением криогенной системы. Большое сопротивление коммуникации и большие газовые нагрузки от газовыделения материалов приводят к необходимости увеличения откачных постов, что значительно усложняет вакуумную систему. Поэтому, решение проблемы вакуумирования теплозащитных полостей протяженных криогенных магистралей является важным звеном в их создании.

Проведение исследований, направленных на повышение эффективности тепловой защиты криогенных магистралей, является одним из путей выполнения решений XXV съезда КПСС о развитии теоретических и экспериментальных работ в области низких температур.

Цель работы. Целью работы является комплексное исследование процессов в теплозащитных полостях протяженных криогенных магистралей при их вакуумировании выносными насосами и разработка методики расчета.

Научная новизна. Впервые проведен анализ неуставившегося течения газа в теплозащитных полостях при молекулярном режиме и разработана методика вакуумного расчета теплозащитных полостей криогенных магистралей с учетом их сложной геометрии и распределенной газовой нагрузки. Экспериментально получены зависимости изменения удельной скорости и состава газовыделения материалов многослойной изоляции и адсорбентов во времени. Установлено влияние количества связующего вещества в стеклоткане на её газовыделение и проводимость слоев изоляции. Предложена расчетная зависимость, позволяющая определить проводимость слоев вакуумно-многослойной изоляции с стекловолокнистыми прокладочными материалами.

Методика исследований. Теоретический анализ и расчет процесса вакуумирования теплозащитных полостей криогенных магистралей проводился с помощью ЭВМ БЭСМ-4. Определение величины и состава газовыделения материалов велось методом диафрагмы известной проводимо-

сти с использованием омегатрона РМО-4С. При экспериментальном определении проводимости слоёв вакуумно-многослойной изоляции использовался метод постоянного потока.

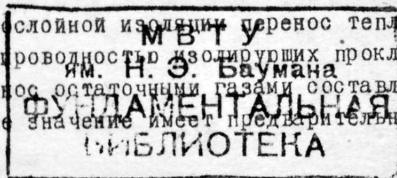
Практическая ценность. Выпущен руководящий расчётный материал предприятия, который с результатами масс-спектрометрического исследования кинетики газовыделения материалов, а также исследования проводимости слоёв изоляции позволяет определить основные параметры вакуумной системы криогенных магистралей, выбрать технологический режим откачки. Это дало возможность более чем в два раза сократить количество вакуумного оборудования, приходящегося на единицу длины магистрали, уменьшить удельные теплопритоки. Предложен новый способ нанесения изоляции, при котором обеспечиваются лучшие условия для удаления газа из её слоёв с сохранением прежних параметров по защите от лучистого потока. Результаты работы способствуют проведению унификации конструкций криогенных трубопроводов и вакуумных систем магистралей. Полученные результаты масс-спектрометрического исследования кинетики газовыделения материалов и исследования проводимости слоёв вакуумно-многослойной теплоизоляции могут использоваться при проектировании криогенных систем различного назначения.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования" г.Казань, 1976 г. Основное содержание работы изложено в четырёх статьях и трёх научно-исследовательских отчётах. По материалам диссертации получено одно авторское свидетельство.

Объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, библиографии (80 наименований) и приложения. Она содержит 104 страницы машинописного текста, 46 рисунков и 4 таблицы.

В первой главе определены требования к вакуумной системе криогенных магистралей и рассмотрены конструкции теплозащитных полос-тей. Дан анализ работ, посвящённых исследованию течения газа в системах с распределёнными параметрами, газовыделению материалов и проводимости слоёв многослойной изоляции. Сформулированы задачи исследования.

В вакуумно-многослойной изоляции перенос тепла осуществляется излучением, теплопроводностью изолирующих прокладок и остаточных газов. Теплоперенос остаточными газами составляет значительную долю, при этом важное значение имеет предварительное вакуумирование.



ние перед охлаждением криогенной системы. Изменение давления газа перед охлаждением с 10^{-2} до 10^{-3} мм рт.ст. приводит к уменьшению теплового потока примерно на порядок.

Криогенный трубопровод состоит из рабочего трубопровода, многослойной изоляции, кожуха и опор. В зависимости от требований к тепловой защите он может быть без промежуточного охлаждаемого экрана или с экраном. Наличие холодных поверхностей создаёт благоприятные условия для применения адсорбционных насосов, обеспечивающих требуемое давление в теплозащитной полости при эксплуатации криогенной магистрали. Адсорбционные насосы размещают на коротких участках равномерно по длине магистрали. Многослойная изоляция состоит из экранов и прокладочных материалов между ними. Наилучшими прокладочными материалами считаются стекловолоконистые. Они изготавливаются в виде полотна, при этом для формирования структуры добавляется связующее вещество. При сравнительно небольших объёмах теплозащитные полости криогенных магистралей имеют развитие поверхности за счёт многослойной изоляции. Кроме того, при их вакуумировании на этапе до охлаждения криогенной системы адсорбент регенерируется. Поэтому в теплозащитных полостях возможны большие газовые нагрузки, определяемые газовыделением изоляции и адсорбента. Большая протяжённость и большое сопротивление коммуникаций, значительные локальные и распределённые газовые нагрузки, с одной стороны, и высокие требования к вакууму, с другой, ставят проблему вакуумирования криогенных магистралей, от решения которой зависит эффективность вакуумно-многослойной теплоизоляции и оптимизация конструкции вакуумной системы.

Получение требуемого остаточного давления характеризуется нестационарностью процессов. Анализ теоретических работ показывает, что для описания неустановившегося течения газа вдоль трубопровода при молекулярном режиме можно использовать модель Кнудсена, которая позволяет рассматривать газ как сплошную среду, а все особенности, связанные с молекулярной структурой, учитывать параметром U , характеризующим его проводимость. В этом случае задача сводится к интегрированию системы параболических уравнений. Однако, сложность вакуумных коммуникаций и схем распределения газовых нагрузок не позволяют использовать имеющиеся решения. Кроме того, для описания течения газа в слоях изоляции необходимо знать их проводимость. Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что стекловолоконистые прокладочные материалы существенно усложняют её определение. Для замыкания решения необходимы данные

о составе и законе изменения во времени величины удельной скорости газовыделения материалов изоляции и адсорбентов. Из обзора следует, что эти данные ограничены и для большинства отечественных материалов изоляции и адсорбентов отсутствуют.

Таким образом, для решения проблемы вакуумирования теплозащитных полостей требуется комплексное исследование как процесса течения газа в теплозащитных полостях с учётом их сложной геометрии, так и процесса газовыделения материалов. В связи с этим в работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследование нестационарного процесса течения газа в теплозащитных полостях протяжённых магистралей с вакуумно-многослойной изоляцией.

2. Масс-спектрометрическое исследование кинетики газовыделения материалов многослойной изоляции, адсорбентов и нержавеющей стали.

3. Исследование течения газа в слоях изоляции и определение их проводимости.

4. Разработка методики расчёта вакуумной системы криогенных магистралей.

Во второй главе проведено теоретическое исследование неустановившегося течения газа в вакуумной полости вдоль криогенной магистрали и в слоях изоляции до охлаждения системы, определены условия перехода неустановившегося течения в квазистационарное, получены решения.

Неустановившееся течение газа в слоях изоляции.

Рассматривается истечение газа из цилиндрических пакетов, уложенных в один ряд с перекрытием зазоров между ними плёнкой (эта схема монтажа изоляции применяется на криогенных магистралях с повышенными требованиями к тепловой защите). Предполагается, что проводимость слоёв изоляции U_i и газовыделение с поверхности материалов $q_i(x_i, t)$ известны. С целью упрощения, в исследуемой модели зазоры между пакетами перекрыты кольцевыми экранами, причём ширина колец $2l_2$ меньше длины пакетов $2l_1$ и располагаются они симметрично относительно середины зазоров. Учитывая, что длина вакуумной системы обычно значительно превышает длину пакетов, изменением давления газа в вакуумной полости на длине трёх пакетов можно пренебречь, т.е. принять $P(x) = \text{const}$. В этом случае истечение газа из пакета должно идти симметрично относительно его середины и оно описывается системой параболических уравнений

$$P_i \frac{\partial P_i}{\partial t} = U_i l_i \frac{\partial^2 P_i}{\partial x_i^2} + q_i(x_i, t) \quad (I)$$

где $i = 1, 2, \dots, N+1$;

N – число слоёв в пакете;

F_i – площадь кольцевого зазора, по которому течёт газ;

U_i – проводимость канала;

$q_i(x_i, t)$ – скорость газовыделения с поверхности i -ого канала единичной длины.

Решение системы уравнений такого вида зависит от условий, задаваемых на границах исследуемой области переменной x_i , в узлах системы, а также от начального условия. Пусть распределение давления газа в начальный момент времени в слоях изоляции будет

$$P_i(x_i, 0) = \psi_i(x_i).$$

Из симметричности течения газа в пакете следует

$$\left. \frac{dP_i}{dx_i} \right|_{x_i=0} = 0$$

(начало координат x_i в середине пакета).

Давление газа на выходе из изоляции равно давлению газа в вакуумной полости

$$P_{N+1}|_{x_{N+1}=L} = P(x)|_{x=d}$$

(d – координата выходного отверстия из изоляции на координатной оси x в вакуумной полости магистрали).

Условия сопряжения определяются из неразрывности потоков в зазоре между пакетами

$$\sum_{i=1}^N U_i \ell_i \left. \frac{dP_i}{dx_i} \right|_{x_i=\ell_i} = U_{N+1} \ell_2 \left. \frac{dP_{N+1}}{dx_{N+1}} \right|_{x_{N+1}=\ell_1}$$

и равенства давлений на выходе из пакета давлению в зазоре между пакетами и давлению на входе в зазор между плёнкой и пакетом.

$$P_i|_{x_i=\ell_i} = P_3 = P_{N+1}|_{x_{N+1}=\ell_1}.$$

Сформулированная таким образом задача решена методом разделения переменных при следующих допущениях:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_N = U_1;$$

$$q_1(x_1, t) = q_2(x_2, t) = \dots = q_N(x_N, t) = q_1(x_1, t)$$

(при диаметре рабочего трубопровода 100 мм эти параметры, определённые для внутреннего и наружного слоёв не отличаются более чем на 5%, что не влияет на результаты анализа).

Давление в слоях изоляции описывается системой уравнений

$$P_i(x_i, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{in} \cos \mu_n x_i \exp(-\mu_n^2 t) \left[1 + \int_0^t G_n(\tau) \exp(\mu_n^2 \tau) d\tau \right]$$
$$0 \leq x_i \leq 1,$$

$$P_2(x_1, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{1n} R_n \sin \left[\frac{\mu_n}{a} (x_1 - K) \right] \exp(-\mu_n^2 t) \left[1 + \int_0^t G_n(\tau) \exp(\mu_n^2 \tau) d\tau \right] \quad (2)$$

$$1 \leq x_1 \leq K,$$

где

$$A_{1n} = \frac{NF_1 \int_0^1 [\varphi_1(x_1) - P(d)] \cos \mu_n x_1 dx_1 - R_n F_2 \int_1^K [\varphi_2(x_1) - P(d)] \sin \left[\frac{\mu_n}{a} (K - x_1) \right] dx_1}{NF_1 \int_0^1 \cos^2 \mu_n x_1 dx_1 - R_n^2 F_2 \int_1^K \sin^2 \left[\frac{\mu_n}{a} (K - x_1) \right] dx_1},$$

$$G_n(t) = \frac{NF_1 \int_0^1 \dot{q}_1(x_1, t) \cos \mu_n x_1 dx_1 - R_n F_2 \int_1^K \dot{q}_2(x_1, t) \sin \left[\frac{\mu_n}{a} (K - x_1) \right] dx_1}{NF_1 \int_0^1 \cos^2 \mu_n x_1 dx_1 - R_n^2 F_2 \int_1^K \sin^2 \left[\frac{\mu_n}{a} (K - x_1) \right] dx_1},$$

$$R_n = - \frac{\cos \mu_n}{\sin \left[\frac{\mu_n}{a} (K - 1) \right]}; \quad t_x = \frac{F_1 \cdot \ell_1}{U_1}; \quad \dot{P}_i(x_1) = \frac{P_i(x_1) - P(d)}{P_x}; \quad K = \frac{L}{\ell_1};$$

$$P_x = 1 \text{ мм рт.ст.}; \quad \alpha^2 = \frac{U_2 \cdot F_1 \cdot \ell_1}{U_1 \cdot F_2 \cdot \ell_2}; \quad L = \ell_1 + \ell_2; \quad d = \frac{U_2 \cdot \ell_2}{U_1 \cdot \ell_1};$$

$$\dot{q}_1(x_1, t) = \frac{q_1(x_1, t) \cdot t_x}{F_1 \cdot P_x}; \quad \dot{q}_2(x_1, t) = \frac{q_2(x_1, t) \cdot t_x}{F_2 \cdot P_x}.$$

Сообственные числа μ_n определяются из уравнения

$$t_q \mu_n = \frac{d}{a \cdot N} \operatorname{ctg} \left[\frac{\mu_n}{a} (K - 1) \right]. \quad (3)$$

Неустановившееся течение газа вдоль трубопровода.

Рассматривается вакуумирование теплозащитных полостей без промежуточного охлаждаемого экрана (рис.1) и с экраном (рис.2).

Учитываются распределённая газовая нагрузка $q(x, t)$ от газовыделения материалов и из слоёв изоляции, а также локальные источники газовыделения G , которыми являются адсорбционные насосы. Неустановившееся течение газа в теплозащитной полости с экраном описывается системой уравнений

$$F_{1,i} \frac{\partial P_{1,i}}{\partial t} = W_{1,i} \frac{\partial^2 P_{1,i}}{\partial x^2} + q_{1,i}(x, t) \quad (4)$$

$$L_{1-1} \leq x \leq L_{1i}; \quad i = 1, 2, \dots, 2N;$$

$$F_{2,j} \frac{\partial P_{2,j}}{\partial t} = W_{2,j} \frac{\partial^2 P_{2,j}}{\partial x^2} + q_{2,j}(x, t)$$

$$L_{j-2} \leq x \leq L_{ji}; \quad j = 2, 4, \dots, 2N;$$

где $W = U \cdot \ell$ — проводимость вакуумной системы единичной длины;

F — площадь зазора, по которому течёт газ.

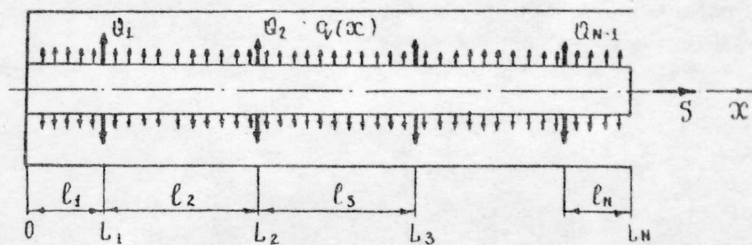


Рис. 1

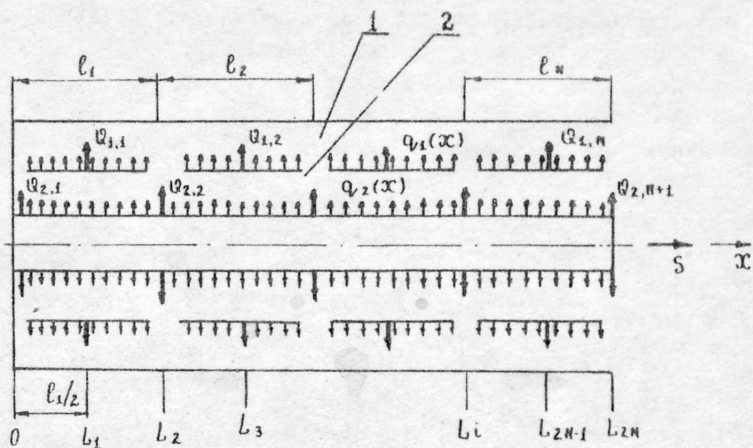


Рис. 2

Начальные условия определяются как известные функции распределения давления в начальный момент времени

$$P_{1,i}(x,0) = \varphi_{1,i}(x),$$

$$P_{2,j}(x,0) = \varphi_{2,j}(x).$$

Граничные условия находятся из неразрывности потоков. Если не учитывать газовыделения и газопроницаемости торцевой поверхности из-за её малости, то на закрытом конце они имеют вид

$$W_{1,1} \frac{dP_{1,1}}{dx} \Big|_{x=0} + W_{2,2} \frac{dP_{2,2}}{dx} \Big|_{x=0} + Q_{2,1} = 0,$$

$$W_{1,1} \frac{dP_{1,1}}{dx} \Big|_{x=0} = U_{0,0} (P_{1,1} \Big|_{x=0} - P_{2,2} \Big|_{x=0}),$$

а у насоса

$$W_{1,2N} \frac{dP_{1,2N}}{dx} \Big|_{x=L_{2N}} + W_{2,2N} \frac{dP_{2,2N}}{dx} \Big|_{x=L_{2N}} = Q_{2,N+1} - S P_{1,2N} \Big|_{x=L_{2N}},$$

$$Q_{2,N+1} - W_{2,2N} \frac{dP_{2,2N}}{dx} \Big|_{x=L_{2N}} = U_{0,2N} (P_{2,2N} \Big|_{x=L_{2N}} - P_{1,2N} \Big|_{x=L_{2N}}),$$

где U_0 — проводимость отверстия в охлаждаемом экране, соединяющем наружную "1" и внутреннюю "2" полости;

S — эффективная быстрота действия вакуумного насоса в сечении $x=L_{2N}$.

Условия сопряжения определяются из неразрывности потоков и равенства давлений в узлах системы:

$$j = 2i + 1, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

$$W_{1,j} \frac{dP_{1,j}}{dx} \Big|_{x=L_i} = W_{1,j+1} \frac{dP_{1,j+1}}{dx} \Big|_{x=L_j} + Q_{1,i+1};$$

$$i = 1, 2, \dots, 2N-1,$$

$$P_{1,i} \Big|_{x=L_i} = P_{1,i+1} \Big|_{x=L_i};$$

$$j = 2 \cdot i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$P_{2,j} \Big|_{x=L_j} = P_{2,j+2} \Big|_{x=L_j},$$

$$W_{1,j} \frac{dP_{1,j}}{dx} \Big|_{x=L_j} + W_{2,j} \frac{dP_{2,j}}{dx} \Big|_{x=L_j} - Q_{2,i} = W_{1,j+1} \frac{dP_{1,j+1}}{dx} \Big|_{x=L_j} + W_{2,j+2} \frac{dP_{2,j+2}}{dx} \Big|_{x=L_j},$$

$$W_{1,j} \frac{dP_{1,j}}{dx} \Big|_{x=L_j} - W_{1,j+1} \frac{dP_{1,j+1}}{dx} \Big|_{x=L_j} = U_{c,j} (P_{1,j} \Big|_{x=L_j} - P_{2,j} \Big|_{x=L_j}).$$

Для теплозащитных полостей без экрана (рис. I) математическая формулировка задачи упрощается. Так как имеется только одна вакуумная полость, то сокращается система уравнений (4) и отсутствуют условия, учитывающие перетекание газа из одной полости в другую. Интегрирование системы уравнений (4) осуществлялось операционным методом. Получены системы уравнений, описывающие распределение давления газа вдоль вакуумной полости с экраном и без экрана. Так, при отсутствии экрана, для случая, когда локальная газовая нагрузка расположена в середине вакуумной системы, т.е. $N=2$, эти уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{P}_1(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_1(\mu_n, x)}{\Psi'(\mu_n)} e^{-\mu_n^2 t} \\ &\quad 0 \leq x \leq L/2, \\ \dot{P}_2(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Phi_2(\mu_n, x)}{\Psi'(\mu_n)} e^{-\mu_n^2 t} \\ &\quad L/2 \leq x \leq L, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_1(\mu_n, x) &= [\beta(\gamma_1 - \mu_n^2)(C_0 + \gamma - \mu_n^2) + Q_0 \mu_n (\gamma - \mu_n^2)(\mu_n \cos \mu_n + \beta \sin \mu_n)] \cos x \mu_n; \\ \Phi_2(\mu_n, x) &= \beta(\gamma_1 - \mu_n^2)(C_0 + \gamma - \mu_n^2) \cos x \mu_n + Q_0 \mu_n (\gamma - \mu_n^2) [\mu_n \cos(2-x)\mu_n + \\ &\quad + \beta \sin(2-x)\mu_n] \cos \mu_n; \\ \Psi'(\mu_n) &= (\beta \cos 2\mu_n - \mu_n \sin 2\mu_n) [(\gamma - \mu_n^2)(\gamma_1 - \mu_n^2) + \mu_n^2(\mu_n^2 - \gamma_1) + \mu_n^2(\mu_n^2 - \\ &\quad - \gamma)] - \mu_n (\gamma - \mu_n^2)(\gamma_1 - \mu_n^2) \left(\frac{2\beta + 1}{2} \sin 2\mu_n + \mu_n \cos 2\mu_n \right); \end{aligned}$$

$$\dot{P} = \frac{\varphi - P}{\varphi}; \quad t x = \frac{F \cdot \ell^2}{W}; \quad G(x, t) = \frac{q(x, t) \cdot t x}{F \cdot \varphi}; \quad Q(t) = \frac{\varphi(t) \cdot \ell}{W \cdot \varphi};$$

$$\beta = \frac{S \cdot \ell}{W}; \quad L = 2 \cdot \ell; \quad \mu_1 = 0; \quad \mu_2 = \sqrt{\gamma}; \quad \mu_3 = \sqrt{\gamma_1}.$$

Собственные числа μ_n определяются из уравнения

$$\mu_n \operatorname{tg} 2\mu_n = \beta. \quad (6)$$

Решения получены при следующих ограничениях:

газовая нагрузка во времени изменяется по экспоненциальному закону $q(t) = q_0 \exp(-\gamma t)$, $Q(t) = Q_0 \exp(-\gamma_1 t)$;

распределенная газовая нагрузка по длине вакуумной системы не меняется $q(x) = q = \text{const}$;

давление в вакуумной полости в начальный момент времени по длине не меняется $\varphi(x) = \varphi = \text{const}$.

Из уравнений (2) и (5) видно, что давление газа в изоляции зависит от давления в вакуумной полости и наоборот, т.е. требуется совместное решение полученных уравнений. Анализ потока газа из изоляции показывает, что при выполнении следующих условий

$$t > 1/\mu_1^2, \mu_1 \gg \omega \quad (7)$$

$$\text{и} \quad \frac{q_0}{\mu_1^2} \exp \mu_1^2 t \gg \varphi_1 - P(d), \quad (8)$$

где μ_1 — первый корень трансцендентного уравнения (3), поток не зависит от давления газа в вакуумной полости $P(d)$ и определяется по формуле

$$q(t) = \frac{F_1}{L} q_0 \exp(-\omega^2 t),$$

где F_1 — суммарная поверхность изоляции;

L — длина вакуумной системы.

В этом случае совместного решения уравнений (2) и (5) не требуется. Постоянная времени процесса вакуумирования, определяемая по формуле $t = F_1 L / U \mu_1^2$, характеризует скорость эвакуации газа из слоев $t_{\text{си}}$ или вакуумной полости $t_{\text{ап}}$. Для процесса газовыделения при экспоненциальном законе изменения его во времени, она определяется по формуле $t_r = 1/\omega^2$. Если $t_r \gg t_{\text{ап}} > t_{\text{си}}$ и выполняется условие (8), то в теплозащитной полости имеет место квазистационарный процесс. Для этого случая получены расчетные зависимости, определяющие распределение давления газа по длине вакуумной полости с экраном и без экрана. Так давление газа в вакуумной полости без экрана описывается системой уравнений

$$P_i(x) = -\frac{q x^2}{2W} - \frac{(i-1)qx}{W} + \frac{[q(i-1)^2 + (q+qe)(N-1)^2]e}{2W} + \frac{(N-1)(q+qe)}{5}$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

Это решение получено при следующих ограничениях

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{N-1} = Q, \quad 2l_1 = l_2 = \dots = l_{N-1} = 2l_N = l,$$

которые выполняются при равномерном размещении адсорбционных насосов и изоляции по длине.

Третья глава посвящена экспериментальному масс-спектрометрическому исследованию кинетики газовыделения материалов. Определено влияние связываемого вещества на газовыделение стекловолокнистых прокладочных материалов.

Масс-спектрометрическое исследование газовыделения материалов проводилось в динамическом режиме. Величина потока определялась методом диафрагмы известной проводимости. Рабочая камера объемом

$\sim 0,15$ л с атмосферного давления до давления 10^{-4} мм рт.ст. откачивалась двумя адсорбционными насосами, а в процессе эксперимента магниторазрядным насосом ТРИОН-150. Диафрагма устанавливалась на выходе из камеры. Полные давления измерялись датчиками ПМИ-2, а парциальные — двумя омегатронами РМО-4С с приборами ИПДО-2А. Для уменьшения собственного фона установки камера изготовлялась из стекла, а коммуникации из нержавеющей стали. Перед экспериментом рабочая часть установки обезгаживалась при 400 С и её собственный фон учитывался при обработке результатов. Полученные результаты показывают, что после двадцати часов вакуумирования величина удельной скорости газовыделения изменяется во времени по экспоненциальному закону. Для изоляционных материалов и адсорбентов определены постоянные параметры этого закона, которые представлены в таблице.

Материал	$Q_{020}, \frac{\text{л мм рт.ст.}}{\text{с см}^2}$	$\omega^2, \frac{1}{\text{с}}$	$t_{\text{г}}, \text{с}$
ЭВТИ-7	$8 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^5$
ЭВТИ-15	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^4$
СФР	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^4$
СВШ-Т			
(0% связки)	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^4$
СВШ-Т			
(6% связки)	$5 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^5$
АОО			
(сырая)	$9 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^4$
АОО			
(отожжённая)	$6 \cdot 10^{-10}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^5$
ПЭТФ-ДА-5	$4 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^5$
ПЭТФ-ДА-12	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^5$
ААУТ	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^5$
СаА-4В	$2,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{л мм рт.ст.}}{\text{с г}}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^5$
СаЕН-4В	$3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{л мм рт.ст.}}{\text{с г}}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^5$
Стеклолента	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$7,7 \cdot 10^5$
Стеклоткань	$3 \cdot 9,5 \cdot 10^{-10}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^5$
Стеклоткань			
ЭН I/100	$2,1 \cdot 10^{-9}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^5$
Сталь			
ОХИЗЛП9	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^5$

В первые пятьдесят часов вакуумирования в составе газовыделения

материалов многослойной изоляции преобладают пары воды ($70 + 95\%$), а у адсорбентов — водород (50%), остальное вода и двадцать восьмая масса (N_2 и CO).

Исследование влияния количества связующего вещества на газовыделение стекломатериалов проводилось на стеклобумаге СБШ-Т с диаметром волокон $0,5$ мк, опытное производство которого впервые в СССР освоено в 1976 году совместно организациями НПО "Криогенмаш", ФТИИТ АН УССР и ВНИИСП. Результаты экспериментов показали, что увеличение количества связки (в данном случае поливинилацетатной эмульсии) сначала уменьшает удельную скорость газовыделения и при 5% -ом содержании она достигает минимума, уменьшаясь более чем на порядок, а потом — увеличивается. Состав газовыделения после добавления связующего вещества не изменился.

В четвёртой главе экспериментально исследовано течение газа в слоях многослойной изоляции, определена интегральная проводимость цилиндрических пакетов в зависимости от материалов изоляции, плотности упаковки, длины пакетов и молекулярного веса газа; предложена физическая модель течения газа в слоях и расчётная зависимость для определения их проводимости.

Проводимость слоёв многослойной изоляции исследовалась методом постоянного потока при молекулярном режиме. При температуре окружающей среды исследуемый поток газа (воздух или He) известной величины пропускаться через цилиндрический пакет вдоль его оси. Интегральная проводимость пакета находилась в результате деления величины потока на разность давлений газа на концах пакета. Величина потока определялась бюреткой и методом диафрагмы известной проводимости. Исследование велось в интервале давлений $10^{-1} + 10^{-4}$ мм рт.ст., которое измерялось датчиками ПМТ-2 и ПМИ-2. Для предотвращения перетекания газа по зазору между пакетом и поверхностью камеры, наружный слой пакета по периметру приклеивался к поверхности камеры эпоксидной смолой. С целью уменьшения погрешности перед экспериментом снимался собственный фон установки, который учитывался при обработке результатов.

На первом этапе интегральная проводимость пакета определялась в зависимости от его длины l , плотности упаковки ρ и молекулярного веса газа M . Пакет состоял из плёнки ПЭТФ-ДА-12 с прокладкой из ЭВТИ-15. В результате анализа полученных экспериментальных данных было сделано предположение, что основная масса газа в продольном направлении движется по каналу, образованному поверхностями экрана и прокладочного материала. В этом случае цилиндрический

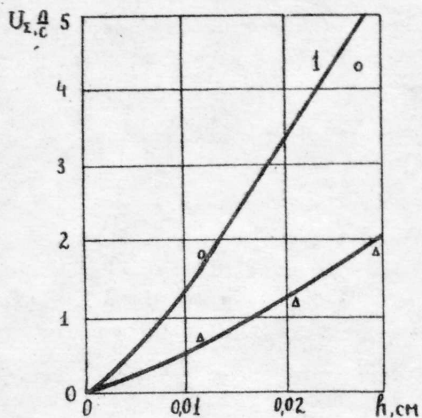


Рис.3 Интегральная проводимость пакета в зависимости от величины зазора между экраном и прокладкой: 1 - по He; 2 - по воздуху.

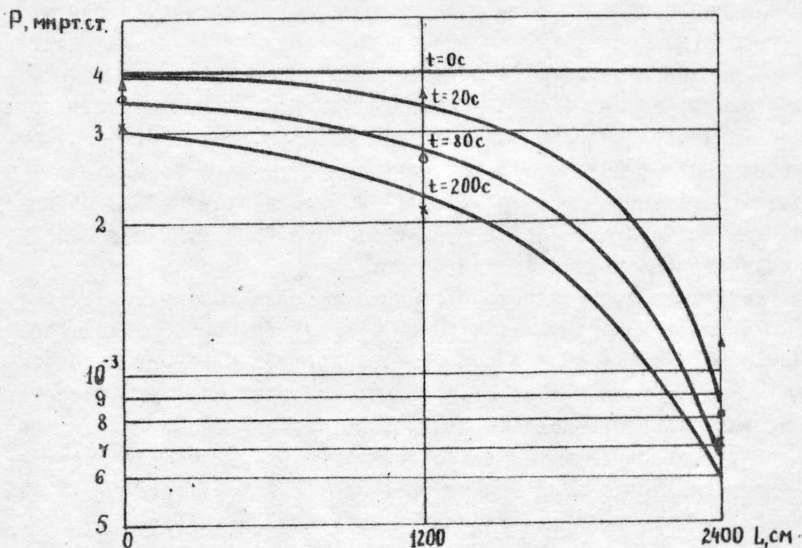


Рис.4 Нестационарный процесс вакуумирования трубопровода.

— расчётная кривая,
 $\Delta, \circ, \times$ - результаты эксперимента.

пакет можно рассматривать как систему параллельных коаксиальных трубопроводов, образованную этими поверхностями, и его интегральная проводимость должна определяться по формуле

$$U_2 = \frac{21\sqrt{M_0 T} [1 - \rho(h_2 + h_n)]^2 (d_1^2 - d_2^2)}{\rho \ell \sqrt{293 \cdot M_r}}, \quad \frac{n}{c} \quad (9)$$

где M_0, M_r — молекулярный вес воздуха и газа;

ρ — количество экранов в 1 см;

h_2, h_n — толщина экрана и прокладки, см;

d_1, d_2 — наружный и внутренний диаметры пакета, см;

ℓ — длина пакета, см.

Сравнение результатов экспериментов и расчётов, проведенных по формуле (9), показало хорошее их совпадение (см. рис.3). Это предположение было проверено на текстурах, состоящих из плёнки ПЭТФ-ДА-12 с прокладками из ЭВТИ-7, СФР, СВШ-Т при различных плотностях упаковки и длинах пакетов. Полученные результаты показали, что экспериментальные и расчётные данные хорошо совпадают, если прокладочный стекломатериал в достаточной мере обработан связующим веществом. Исследование влияния количества связующего вещества в прокладочном материале на проводимость слоёв велось на пакете, состоящем из плёнки ПЭТФ-ДА-12 с прокладкой СВШ-Т. В качестве связующего вещества использовался водный раствор поливинилацетатной эмульсии (ПВАЭ). Количество его менялось от 0 до 6 процентов. В результате установлено, что уже при 6%-ом содержании ПВАЭ прокладочный материал имеет хорошо организованную структуру и в пакете его можно учитывать так же как экран.

Результаты теоретического анализа течения газа в теплозащитных полостях криогенных магистралей с вакуумно-многослойной изоляцией и масс-спектрометрического исследования кинетики газовыделения материалов позволили разработать методику расчёта, которая экспериментально проверялась на простой трубе и промышленном криогенном трубопроводе КС 2306. Максимальное расхождение результатов экспериментов и расчётов не превышает 25% (см. рис.4), что подтверждает правильность сделанных допущений и выводов.

Основные выводы.

1. Проведён теоретический анализ процесса вакуумирования и получены системы уравнений, описывающие распределение давления газа в теплозащитных полостях криогенных магистралей с вакуумно-многослойной изоляцией.

2. Проведено масс-спектрометрическое исследование газовыделе-

ния материалов многослойной изоляции, адсорбентов, нержавеющей стали и определены законы изменения во времени величины удельной скорости газовыделения.

Показано влияние количества связующего вещества в стеклобумаге на величину её газовыделения.

3. Проведены исследования проводимости слоёв многослойной изоляции при молекулярном режиме течения газа. Установлено существенное влияние количества связующего вещества в прокладочном стекломатериале на проводимость слоёв. Стекломатериалы, обработанные связующим веществом, имеют упорядоченную структуру самих материалов, а следовательно и слоёв изоляции.

Для расчёта проводимости таких структур предложена расчётная зависимость.

4. По результатам исследований разработан руководящий расчётный материал, позволяющий определить основные конструктивные параметры вакуумной системы криогенных магистралей, выбрать откачное оборудование, определить распределение давления в слоях изоляции и по длине магистрали, время достижения требуемого давления, выбрать технологию вакуумирования.

5. Результаты работы использованы при разработке ряда криогенных систем: СПЛЭП в Кожухово, СК УНК в Протвино. Это позволило на последней системе, длина которой 20 км, сократить количество вакуумного откачного оборудования более чем в два раза.

6. Результаты исследования позволяют проводить унификацию основных геометрических параметров криогенных трубопроводов с вакуумно-многослойной изоляцией.

7. Результаты масс-спектрометрического исследования кинетики газовыделения материалов и исследования проводимости слоёв изоляции могут быть использованы при проектировании криогенных систем с вакуумно-многослойной изоляцией различного назначения.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Макаров А.М., Филин Н.В., Лунёва Л.А., Панкратова Т.А., Тарасов Н.Н. Особенности диффузионных течений разреженного газа в высоковакуумном трубопроводе с поверхностным выделением или поглощением молекул. — В кн.: Процессы в установках и системах. М., 1975, с. 54 — 69.

2. Тарасов Н.Н., Филин Н.В., Куприянов В.И. К расчёту вакуумной системы протяжённых криогенных магистралей. — В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика и техника высокого вакуума.

Харьков, 1976, вып.2, с. 53 - 56.

3. Куприянов В.И., Чубаров Е.В., Тарасов Н.Н., Дрямов В.А. Исследование вакуумных свойств материалов вакуумно-многослойной изоляции.- В кн.: Процессы, технология и контроль в криогенном машиностроении. Сборник научных трудов НПО "Криогенмаш".-М., 1976, с. 140 - 149.

4. Чубаров Е.В., Куприянов В.И., Дрямов В.А., Тарасов Н.Н., Краснорядцева Л.А. Исследование процесса газовыделения стали ОЗХІЗАПІ9.- М.: ЦНТИ-химнефтемаш, 1977. - 27 с. - (Химическое и нефтяное машиностроение. №2).

5. Тарасов Н.Н., Куприянов В.И., Чубаров Е.В. и др. Определение состава и удельной скорости газовыделения материалов вакуумно-многослойной изоляции.- В кн.: Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции, г.Казань, октябрь 1976г. - М., 1976, с. 13.

6. Тарасов Н.Н., Филин Н.В., Крылова Л.В. Определение пропускной способности вакуумно-многослойной изоляции.- В кн.: Основные направления и проблемы создания вакуумного откачного оборудования. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции, г.Казань, октябрь 1976 г. - М., 1976, с. 14.

7. А.с. 497412 (СССР). Вакуумный стенд для определения величины и состава газовыделения. / НПО "Криогенмаш": Авт. изобрет. Макаров А.М., Тарасов Н.Н., Филин Н.В. - Заявл. 14.12.73, №197575 9/24-6; Опубл. 30.12.75. М.Кл. F 04 b 37/14, C 01 n 7/14, УДК 533.59.

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана Л-78776 от 7/3 -79

Тираж 100 экз. Объем I п.л. Заказ 400