



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 97-77

ОУНК

В.В.Кочетов, В.Г.Рогозинский

**Динамика давления пробного газа
при течеискании в протяженной вакуумной камере
при молекулярном режиме течения газа**

Протвино 1997

Аннотация

Кочетов В.В., Рогозинский В.Г. Динамика давления пробного газа при течеискании в протяженной вакуумной камере при молекулярном режиме течения газа: Препринт ИФВЭ 97-77. – Протвино, 1997. – 10 с., 6 рис., библиогр.: 3.

С целью изучения влияния некоторых параметров протяженной вакуумной камеры ускорительно-накопительных комплексов на процесс течеискания сформулирована и решена задача о динамике давления пробного газа при молекулярном режиме течения газа. По полученным зависимостям рассчитаны кривые распределения концентрации пробного газа по координате вдоль камеры для различных моментов времени и различного расположения течей и соответственно — зависимости концентрации от времени.

Из анализа результатов следует, что подсоединение масс-спектрометра к камере в месте подсоединения откачного поста повышает эффективность обнаружения течей.

Abstract

Kochetov V.V., Rogozinsky V.G. Pressure Dynamics of Test Gas on Leak Detecting in Long Vacuum Chamber under Molecular Gas Flow: IHEP Preprint 97-77. – Protvino, 1997. – p. 10, figs. 6, refs.: 3.

The problem of pressure dynamics for the test gas under molecular flow has been set up and solved to investigate the influence of some parameters of a long vacuum chamber for accelerating complexes on leak detection. The curves for concentrations distribution of the test gas along the vacuum chamber for different points of time and leak locations as well as concentration dependences versus the time have been calculated with the solutions obtained.

В последнее время развитие ускорительной техники идет по пути создания крупных ускорительно-накопительных комплексов, таких как LEP, УНК, SSL, LHC. Длина вакуумных камер комплексов составляет десятки километров, причем поперечный размер камеры намного меньше ее длины, что привело к понятию протяженной вакуумной системы.

С целью удобства монтажа, наладки и получения рабочего вакуума, и особенно проведения вакуумных испытаний, контроля герметичности и течеискания, камера разбивается на участки, ограниченные разделительными шиберными затворами. Длина этих участков обычно соответствует длине периода магнитной структуры, а в случае сверхпроводящих коллайдеров — еще и структуре криогенной системы охлаждения магнитов. Длина этих участков может составлять 100-400 м, а в случае сверхпроводящих коллайдеров — 600-1000 м. Каждый такой участок камеры имеет дискретно-равномерно расположенные сверхвысоковакуумные насосы и откачной пост на базе турбомолекулярного насоса. Пост используется для предварительной откачки участка камеры и проведения течеискания с помощью подсоединенного к нему гелиевого масс-спектрометрического течеискателя. С точки зрения течеискания, такая вакуумная система имеет ряд особенностей. В работе [1] рассмотрена проблема течения пробного газа через канал течи и динамика его давления в процессе откачки камеры и течеискания в больших сосредоточенных вакуумных системах. Указано на особенности движения пробного газа в протяженной камере за счет диффузии, при которой время перемещения от места течи до отверстия откачки определяется расстоянием между ними и коэффициентом диффузии пробного газа. Это время при определенных условиях может быть достаточно большим. При молекулярном режиме течения газа в камере должно выполняться условие $\bar{p}d < 1,5 \cdot 10^{-2}$ Тор·см, где \bar{p} — среднее давление газа в камере, d — диаметр камеры в см. Так как поток газа через течь q равен $q = S\bar{p}$, то при быстроте действия откачного поста $S = 100$ л/с и $\bar{p} < 1,5 \cdot 10^{-3}$ Тор для $d = 10$ см (камера канала инжекции УНК) должно быть $q < 0,15$ лТор/с. Это значение определяет верхний предел величины потока газа через течь, при котором соблюдается молекулярный режим течения газа по камере. На рис. 1 дана расчетная схема вакуумной системы типового участка камеры между разделительными шиберными затворами с

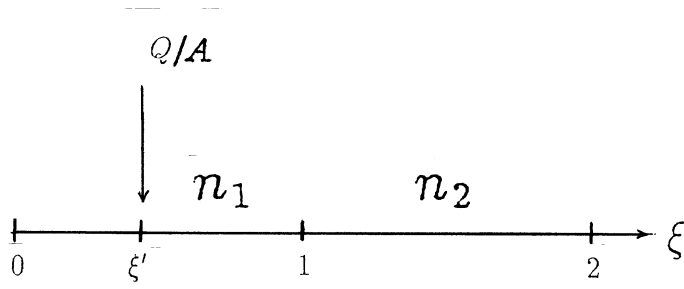


Рис. 1. Расчетная схема вакуумной системы.

откачным постом, обладающим быстротой действия S , расположенным посередине участка в сечении $\xi = 1$. В сечении $\xi = \xi'$ действует мгновенный источник пробного газа мощностью Q/A , где Q – количество пробного газа, прошедшее через канал течи за время обдувания, A – площадь сечения камеры. Предполагается, что время протекания пробного газа через канал течи достаточно мало по сравнению со временем его распространения по камере.

Изменение концентрации пробного газа $n_1(\xi, \tau)$, где $\xi = x/L$ и $\tau = U_o t/AL^2$ – безразмерные координата и время, U_o – удельная проводимость камеры по пробному газу, L – длина половины камеры, в области $0 \leq \xi \leq 1$ описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 n_1}{\partial \xi^2} - \frac{\partial n_1}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

при начальном условии $n_1 = 0$, $\tau = 0$ и одном граничном условии $n'_1 = 0$, $\xi = 0$, что означает отсутствие потока газа в плоскости $\xi = 0$, где расположен шиберный затвор в закрытом состоянии. В области $1 \leq \xi \leq 2$ изменение концентрации пробного газа описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 n_2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial n_2}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

с начальным условием $n_2 = 0$, $\tau = 0$ и граничным условием $n'_2 = 0$, $\xi = 2$ по тем же соображениям, что и для плоскости $\xi = 0$.

Для решения уравнений (1) и (2) необходимо задать еще два граничных условия в плоскости $\xi = 1$. Одно из них — равенство концентрации $n_1 = n_2$, другое — равенство суммы потоков пробного газа из области $0 \leq \xi \leq 1$ и из области $1 \leq \xi \leq 2$ потоку, откачиваемому постом, т.е.

$$-n'_1 + n'_2 = hn_2, \quad (3)$$

где $h = SL/U_o$, а штрих обозначает производную по ξ .

Уравнения (1) и (2) будем решать с помощью интегрального преобразования Лапласа и использования функции влияния мгновенного источника [2]:

$$U = (Q/2AL) \cdot (\pi \cdot \tau)^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\xi - \xi')^2}{4\tau}\right]. \quad (4)$$

Решение уравнения (1) для $\xi > \xi'$ получим в виде

$$n_1 = m \sum_{n=1}^{\infty} \{((-1)^n \sin(\xi - 1)(2n - 1) \frac{\pi}{2} x \cos \xi' (2n - 1) \frac{\pi}{2} -$$

$$\begin{aligned}
& -\cos\xi'(2n-1)\frac{\pi}{2}x\cos\xi(2n-1)\frac{\pi}{2}\exp[-(2n-1)^2\frac{\pi^2}{4}\tau]+ \\
& + \frac{4\mu_n^2\cos\xi'\mu_n x\cos\mu_n \cdot \exp(-\mu_n^2\tau)}{\cos^2\mu_n(h^2+2n+4\mu_n^2)}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Для $\xi < \xi'$ в (5) ξ и ξ' меняются местами в соответствующих выражениях. Для $\xi \geq 1$

$$\begin{aligned}
n_2 = m \sum_{n=1}^{\infty} \{ & [-\cos\xi'(2n-1)\frac{\pi}{2}x\cos(2-\xi)(2n-1)\frac{\pi}{2}]\exp[-(2n-1)^2\frac{\pi^2}{4}\tau]+ \\
& + \frac{4\mu_n^2\cos\xi'\mu_n x\cos(2-\xi)\mu_n \exp(-\mu_n^2\tau)}{\cos^2\mu_n(h^2+2h+2\mu_n^2)} \},
\end{aligned} \tag{6}$$

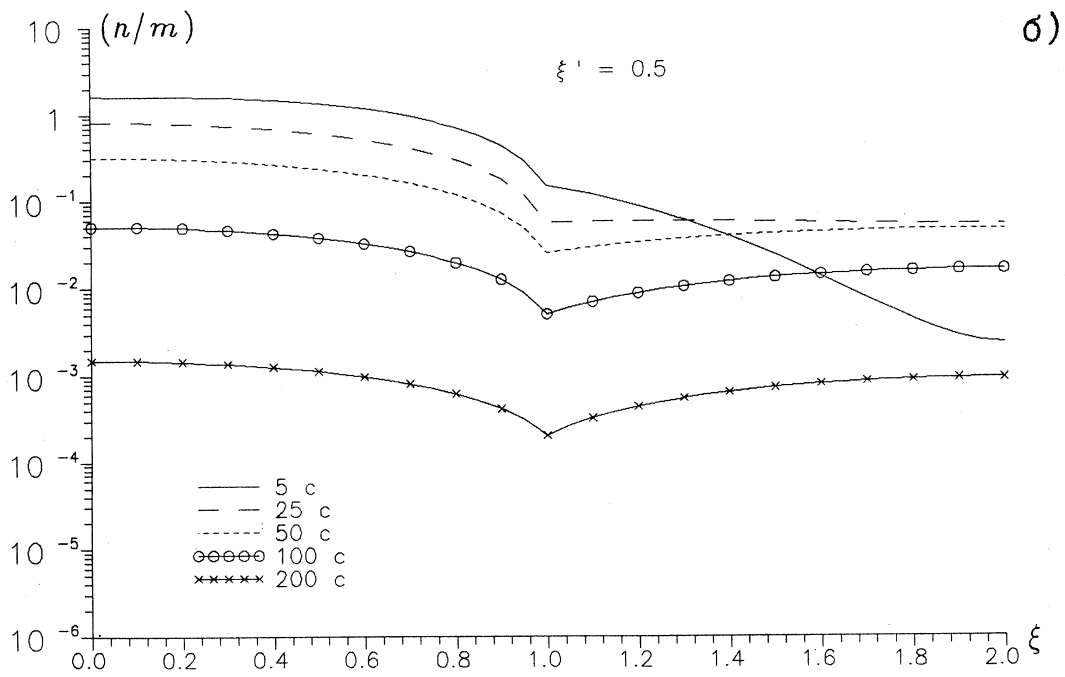
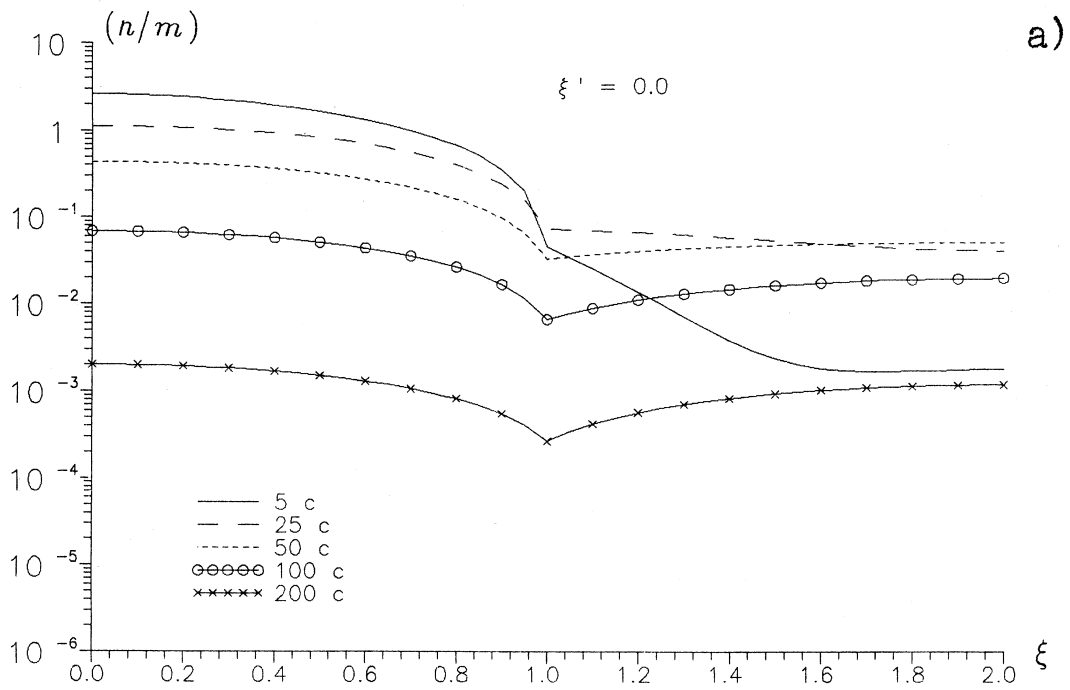
где $m = Q/AL$ (мол \cdot см $^{-3}$), μ_n – последовательные корни уравнения

$$\mu tg\mu = \frac{1}{2}h. \tag{7}$$

На рис. 2а,б представлены кривые распределения относительной концентрации пробного газа гелия по длине камеры, вычисленные по формулам (5) и (6) при $U_o = 3,93 \cdot 10^7$ см 4 /с, $L = 5 \cdot 10^3$ см, $S = 10^5$ см 3 /с и диаметре камеры $d = 10$ см, а также $h = 15$. Видно, что при расположении мгновенного источника в плоскости $\xi' = 0$ и $\xi' = 0,5$ характер кривых идентичен, но в случае $\xi' = 0,5$ кривые идут несколько ниже. Кроме того, в течение первых 5-ти секунд распределение концентрации в области $1 \leq \xi \leq 2$ значительно отличается от распределения в области $0 \leq \xi \leq 1$, что связано с процессом диффузии гелия по камере. Через 100 с распределение концентрации гелия становится почти симметричным относительно плоскости $\xi = 1$, где находится отверстие откачки постом. На рис. 2в представлены аналогичные кривые при $\xi' = 1$. Видно, что распределение концентрации симметрично относительно $\xi = 1$, а через 5 с величины концентраций в плоскости $\xi = 1$ во всех случаях различны, причем для $\xi' = 1$ эта величина наименьшая, что свидетельствует о влиянии в этом месте откачки постом.

На рис. 3а-в даны кривые изменения относительной концентрации гелия в плоскостях $\xi = 0$, $\xi = 1$, $\xi = 2$ соответственно при расположении источника в плоскостях $\xi' = 0$, $\xi' = 0,5$ и $\xi' = 1$. Видно, что для случая $\xi' = 0$ максимум концентрации гелия в плоскости $\xi = 1$ достигается через 10 с, а при $\xi' = 0,5$ – через 5 с, что свидетельствует о влиянии места расположения течи на камере. При $\xi' = 1$ максимум концентрации сильно возрастает, а время его достижения меньше 1 с. Кривые спада концентрации гелия во времени довольно быстро становятся экспоненциальными и характеризуют время очистки камеры от гелия для повторного поиска течей.

Из полученных результатов следует, что подключение масс-спектрометрической камеры гелиевого течеискателя или датчика масс-спектрометра в месте подключения откачного поста может оказаться более эффективным для течеискания, чем течеискатель, подсоединенный на форвакуумной линии поста. Это связано с тем, что время отсчета течеискателя на камере будет меньше, а чувствительность поиска течей выше, что дает возможность повышения точности определения места течи и величины потока газа через течь.



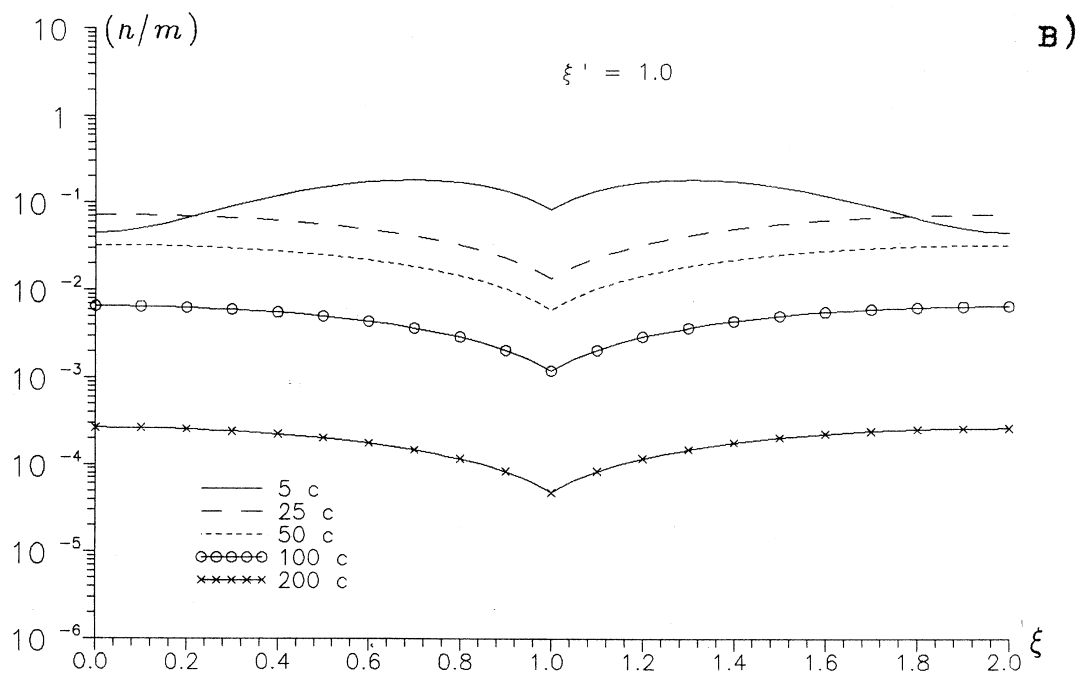
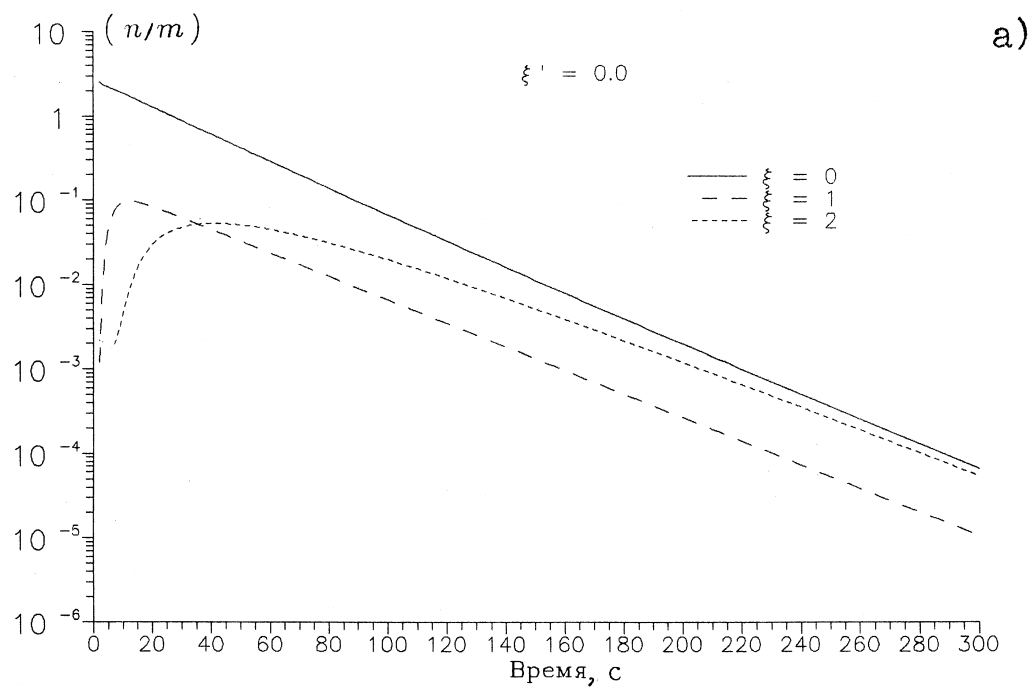


Рис. 2. Распределение относительной концентрации пробного газа гелия по длине камеры для различных моментов времени и расположения течи.



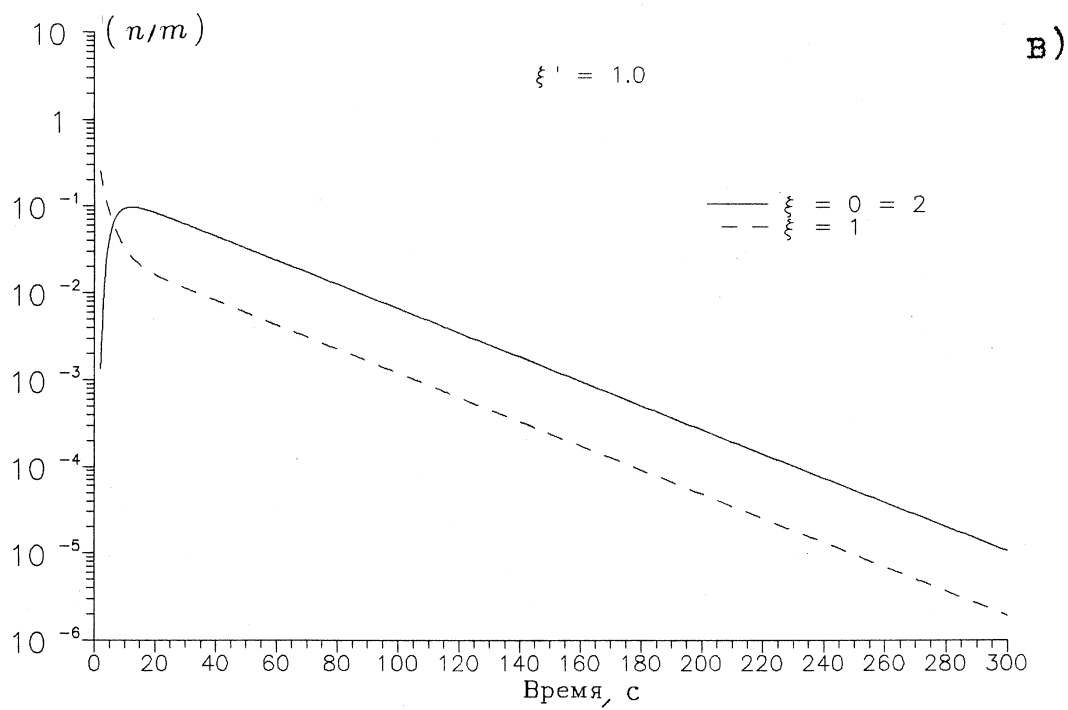
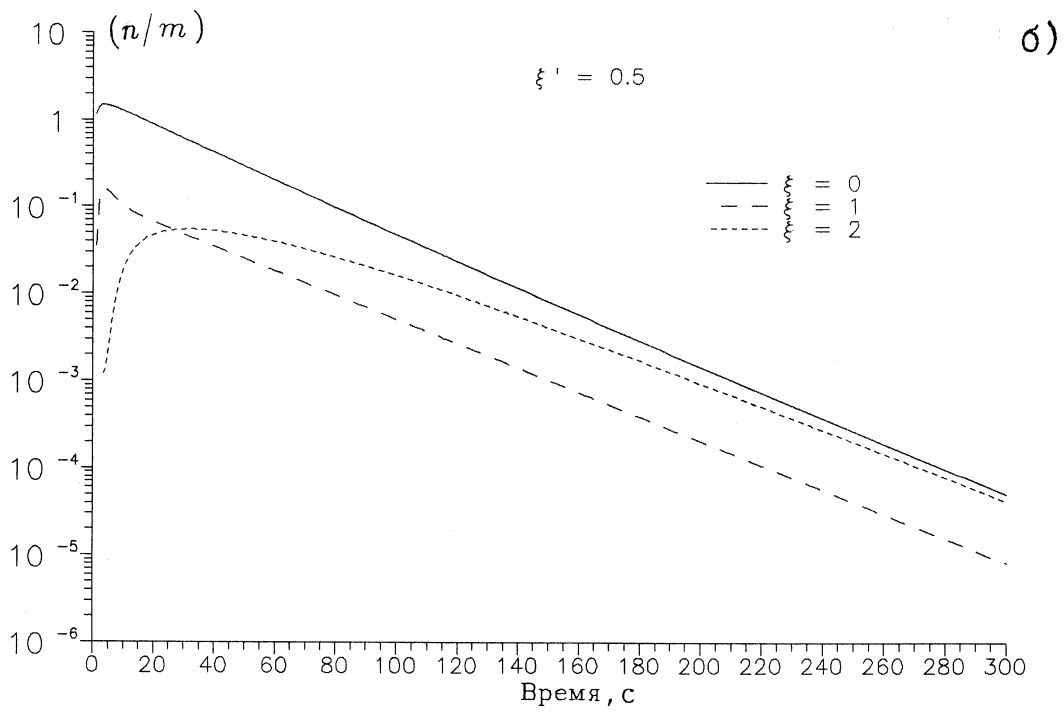


Рис. 3. Зависимости изменения относительной концентрации пробного газа гелия от времени в плоскостях $\xi = 0, 1, 2$ при расположении течи в плоскостях $\xi' = 0; 0, 5; 1$.

Для обнаружения течей может быть использован также магниторазрядный манометр, установленный на камере в месте подсоединения откачного поста. Методика поиска течей и их индикация с использованием манометра подробно изложена в монографии [3]. В реальных протяженных вакуумных системах ускорительно-накопительных комплексов, как правило, устанавливаются с некоторым шагом средства откачки (магниторазрядные, сублимационные насосы и др.), соединенные с камерой трубопроводом и имеющие объемы, в которые может натекать пробный газ при течеискании. При этом, естественно, магниторазрядные насосы должны быть отключены из-за откачки пробного газа, что дает возможность проведения течеискания. На вакуумной системе УНК, например на канале инжекции, насосы устанавливаются через 50 м, т.е. два насоса на участок между разделительными затворами длиной около 100 м, а на регулярной части 1-й ступени УНК – 16 насосов с шагом $\sim 6,5$ м на участок длиной 91 м.

Поэтому представляется интересным рассмотреть задачу о влиянии объема одного насоса на половине участка канала инжекции. На рис. 4 дана расчетная схема с насосом, установленным в сечении $\xi = \xi_0$. С целью упрощения решения задачи изменение концентрации пробного газа в области $1 \leq \xi \leq 2$, как в предыдущем случае, не рассматривается, а будет проведен сравнительный анализ рассматриваемого случая со случаем, когда насос в сечении $\xi = \xi_0$ отсутствует. Уравнения для $n_1(\xi_1\tau)$ и $n_2(\xi_1\tau)$ аналогичны уравнениям (1) и (2), с теми же начальными условиями, а граничные условия будут иметь вид

$$n' = 0, \quad \xi = 0; \quad -n'_2 = hn_2, \quad \xi = 1;$$

$$n_1 = n_2, \quad \xi = \xi_0; \quad \dot{n}_v + kn_v = kn_1, \quad \xi = \xi_0,$$

где $k = UAL^2/VU_0$, V – объем насоса, U – проводимость соединительного трубопровода насоса с камерой. Последнее граничное условие определяется уравнением, описывающим изменение концентрации пробного газа в объеме насоса, натекающего через трубопровод, на входе которого изменяется концентрация пробного газа, текущего по камере.

Решения уравнений в области $0 \leq \xi \leq \xi'$, $\tau > 0$ имеют вид

$$n_1(\xi_1\tau) = \frac{2m}{\xi_0} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \lambda_n \cos(\xi \lambda_n) \sin(\xi_0 - \xi') \lambda_n e^{-\lambda_n^2 \tau} +$$

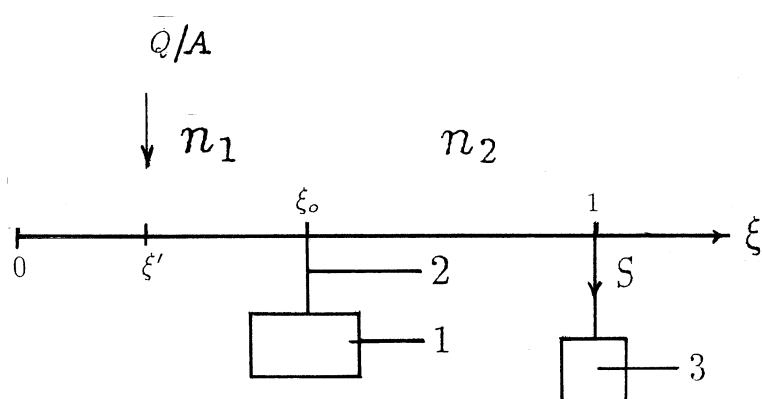


Рис. 4. Расчетная схема участка вакуумной системы с насосом: 1 – магниторазрядный насос; 2 – соединительный трубопровод насоса; 3 – откачной пост с быстротой действия S .

$$\begin{aligned}
& + \frac{2m}{\xi_o} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n-2}}{A_n(\lambda_n)} \lambda_n \cos(\xi' \lambda_n) \cos(\xi \lambda) [\cos(1 - \xi_o) \lambda_n + (h/\lambda_n) \sin(1 - \xi_o) \lambda_n] e^{-\lambda_n^2 \tau} + \\
& + 2m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k - \mu_n^2)}{\cos(\xi_o \mu_n) B_n(\mu_n)} \cos(\xi' \mu_n) \cos(\xi \mu_n) [\cos(1 - \xi_o) \mu_n + (h/\mu_n) \sin(1 - \xi_o) \mu_n] e^{-\mu_n^2 \tau},
\end{aligned} \tag{8}$$

где $m = Q/AL$, $\lambda_n = \frac{2n-1}{2\xi_o} \tau_i$, $a = UL/U_o$,

$$A_n = (k - \lambda_n^2)(\lambda_n \sin \lambda_n - h \cos \lambda_n) + a \lambda_n^2 \cos \xi_o \lambda_n [\cos(1 - \xi_o) \lambda_n + \frac{h}{\lambda_n} \sin(1 - \xi_o) \lambda_n],$$

а μ_n – корни уравнения

$$(k - \mu_n^2)(h \cos \mu_n \sin \mu_n) - a \mu_n^2 \cos(\xi_o \mu_n) [\cos(1 - \xi_o) \mu_n + \frac{h}{\mu_n} \sin(1 - \xi_o) \mu_n] = 0. \tag{9}$$

Выражение для $B_n(\mu_n)$ имеет вид

$$\begin{aligned}
B_n(\mu_n) = & [kh - (3 + h)\mu_n^2] \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} + (2h + k - \mu_n^2) \cos \mu_n + \\
& + a[(2 + h - h\xi_o - \xi_o \mu_n \sin \mu_n \xi_o) \cos \mu_n (1 - \xi_o) + \\
& + (h - \xi_o \mu_n h \sin \mu_n \xi_o - (1 - \xi_o) \mu_n^2) \frac{\sin \mu_n (1 - \xi_o)}{\mu_n}].
\end{aligned} \tag{10}$$

В области $\xi' \leq \xi \leq \xi_o$ в первом члене формулы (8) ξ и ξ' меняются местами, остальные члены – без изменений. После этого расчет распределения $n_1(\xi_1 \tau)$ в области $\xi' \leq \xi \leq \xi_o$ ведется по измененной формуле (8).

В области $\xi_o \leq \xi \leq 1$ $n_2(\xi_1 \tau)$ имеет вид

$$n_2(\xi_1 \tau) = 2m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k - \mu_n^2)}{B_n(\mu_n)} \cos \xi' \mu_n [\cos \mu_n (1 - \xi) + \frac{h}{\mu_n} \sin \mu_n (1 - \xi)] e^{-\mu_n^2 \tau}. \tag{11}$$

Изменение концентрации пробного газа в объеме насоса во времени

$$n_v = 2m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k \cos \xi' \mu_n}{B_n(\mu_n)} [\cos \mu_n (1 - \xi_o) + \frac{h}{\mu_n} \sin \mu_n (1 - \xi_o)] e^{-\mu_n^2 \tau}. \tag{12}$$

Без учета объема насоса $k = 0$, $a = 0$ в области $0 \leq \xi \leq 1$ распределение концентрации пробного газа $n_o(\xi_1 \tau)$ имеет вид

$$n_o(\xi_1 \tau) = 2m \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma_n^2 + h^2}{h^2 + h + \gamma_n^2} \cos \gamma_n \xi' \cos \gamma_n \xi e^{-\gamma_n^2 \tau}, \tag{13}$$

где γ_n — корни уравнения

$$\gamma_n t_g \gamma_n = h. \tag{14}$$

Расчеты концентрации $n_1(\xi_1 \tau)$, $n_2(\xi_1 \tau)$ и $n_o(\xi_1 \tau)$ выполнены по указанным выше формулам при значениях: $h = 15$, $a = 102$, $k = 3, 11 \cdot 10^3$, $\xi' = 0, 25$, $\xi_o = 0, 5$ при значениях ξ в области $0 \leq \xi \leq 1$.

На рис. 5 представлены кривые распределения относительной концентрации пробного газа гелия по длине участка камеры для различных моментов времени, рассчитанные по формулам (8) и (11), а на рис. 6 – по формуле (13).

Из сравнения кривых видно, что с учетом объема насоса кривая для времени 1 с (рис. 5) имеет более пологий максимум, а на соответствующей кривой (рис.6) – максимум острый и выше почти в 2,5 раза. Все остальные кривые этого рисунка расположены выше, чем на рис. 5. Из этого следует, что наличие объема насоса для рассматриваемого случая влияет на распределение концентрации пробного газа в камере и понижает ее величину в сечении, где подсоединен откачной пост и расположен течеискатель, что, по-видимому, снизит динамическую чувствительность течеискания. Но это не окажет существенного влияния на процесс течеискания. Безусловно, на распределение концентрации пробного газа будет влиять как место расположения течи, так и место установки насоса. При большом числе насосов, как, например, на периоде вакуумной системы регулярной магнитной структуры, где устанавливается 16 насосов, решение аналогичной задачи становится весьма громоздким. Потребуется решение около шестнадцати взаимосвязанных уравнений диффузии с соответствующими граничными условиями. Как видно, решение для одного насоса уже является сложным и громоздким. Однако можно указать на то, что при большом числе установленных насосов на участке камеры их объемы будут заполняться гелием неодинаково в зависимости от расположения места течи. Поэтому на таких вакуумных системах следует рекомендовать проведение поиска течи при большем времени обдува или использование способа гелиевого “мешка”, что часто реализуется в практике течеискания на протяженных вакуумных системах.

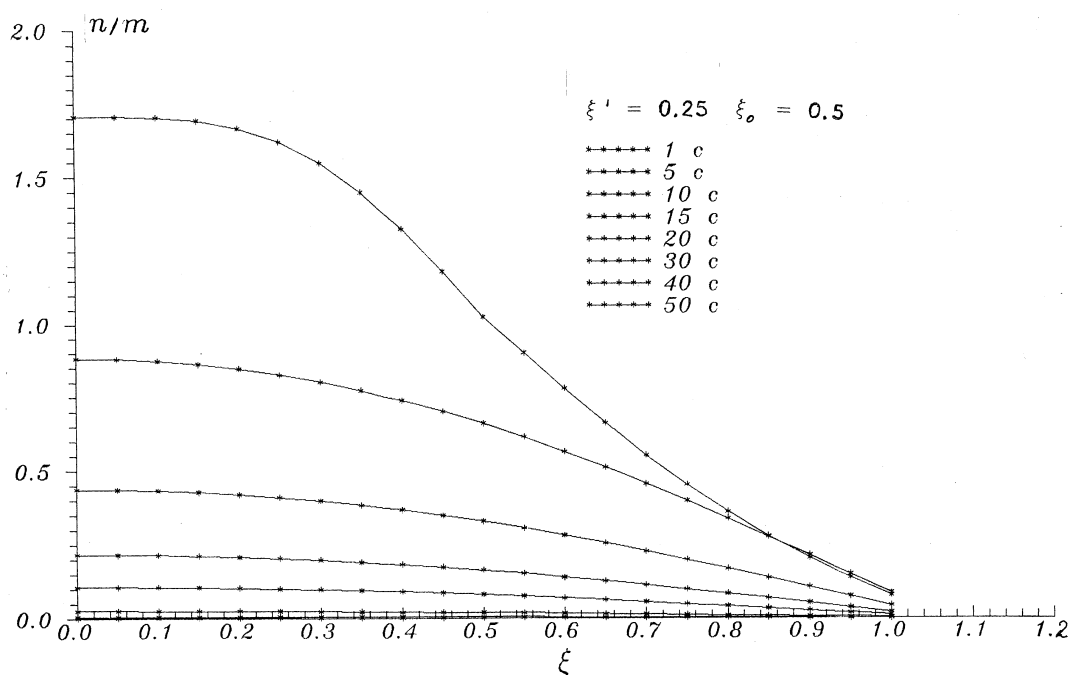


Рис. 5. Распределение относительной концентрации пробного газа гелия по длине камеры для различных моментов времени с течью в плоскости $\xi = \xi'$ и насосом в плоскости $\xi = \xi_0$.

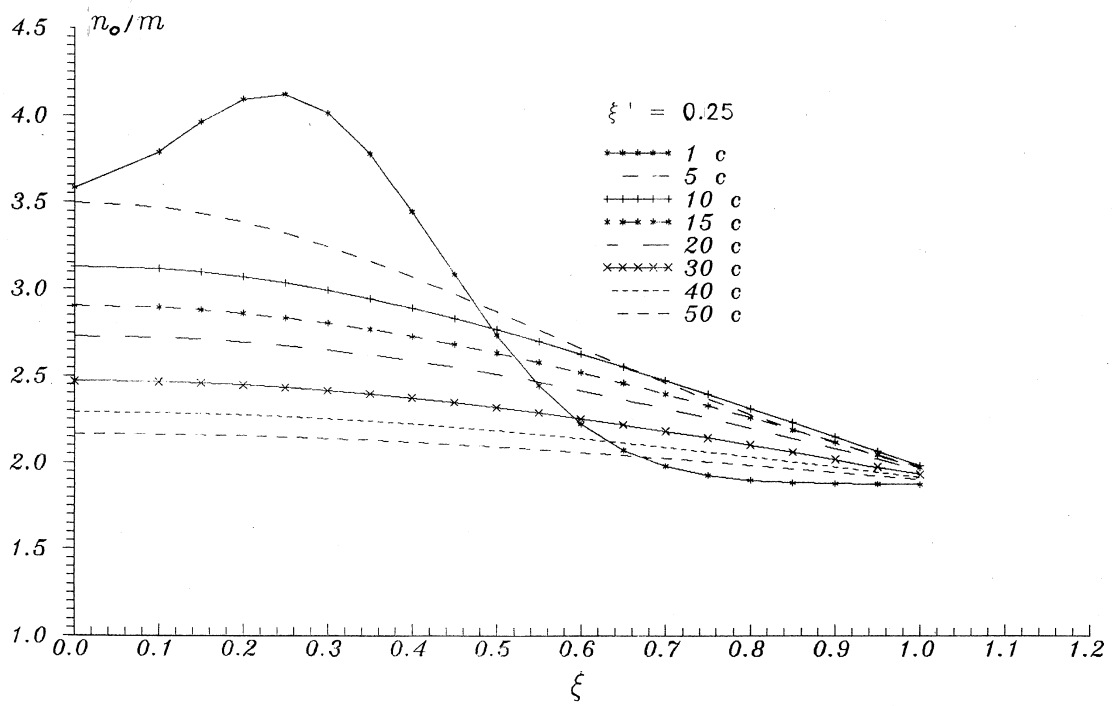


Рис. 6. Распределение относительной концентрации пробного газа гелия по длине камеры для различных моментов времени t с течью в плоскости $\xi = \xi'$ при отсутствии насоса в плоскости $\xi = \xi_0$.

Список литературы

- [1] Рогозинский В.Г. К теории течеискания в вакуумных системах. – Препринт ОИЯИ № 2112, Дубна, 1965.
- [2] Карслоу Г. и Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964, с.353.
- [3] Кузьмин В.В., Левина Л.Е., Творогов Н.В. Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

Рукопись поступила 21 ноября 1997 г.

В.В.Кочетов, В.Г.Рогозинский

Динамика давления пробного газа при течеискании в протяженной вакуумной камере при молекулярном режиме течения газа.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 26.11.97 г. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 0,96. Тираж 150. Заказ 72. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

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

