



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2008–7
ОЭА/ОП

А.В. Ларионов, Е.Н. Ломакин, В.С. Селезнев,
А.Н. Сытин, Ю.С. Ходырев

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА ПРИ ОБЕЗГАЖИВАНИИ
ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРА**

Протвино 2008

Аннотация

Ларионов А.В. и др. Численное моделирование процессов диффузии водорода при обезгаживании вторично-эмиссионного монитора: Препринт ИФВЭ 2008-7. Протвино, 2008. – 19 с., 14 рис., 3 табл., библиогр.: 12.

Система контроля потери пучка на LHC в ЦЕРНе включает группу специальных вторично-эмиссионных мониторов (SEM), предназначенных для измерения фоновой радиации с очень высокими уровнями. Для надежности работы таких мониторов одним из основных требований к их конструкции является наличие вакуума не хуже 10^{-7} атм в течение 20 лет при отсутствии внешней откачки. С этой целью, в частности, осуществлялось обезгаживание SEM на вакуумных стендах в ЦЕРНе и ИФВЭ.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования процессов диффузии H_2 в стенке вакуумной камеры SEM для различных технологических стадий обезгаживания и эксплуатационных условий. Получены зависимости от времени для всех параметров диффузии и потока газовой выделенной с поверхности стенки камеры в соответствии с вакуумно-температурными режимами обезгаживания, отсечения SEM и эксплуатации. Проанализирована как активация находящегося в камере SEM геттера st707 при обезгаживании на стенде ИФВЭ, так и эффективность откачки геттера после отсечения SEM. Эти расчеты позволили определить оптимальную температуру и давление для отсечения. Эти параметры соответственно равны $473 \pm 20^\circ K$ и $(2-4) \cdot 10^{-13}$ атм. Показано также, что геттер может гарантировать выполнение основного требования к вакууму по содержанию H_2 в камере в течение 20 лет.

Abstract

Larionov A.V. et al. Numerical Simulation of the Hydrogen Diffusing Processes at the Outgassing of the Secondary Emission Monitor: IHEP Preprint 2008-7. – Protvino, 2008. – p. 19, figs. 14, tables 3, refs.: 12.

The beam loss monitoring system for LHC in CERN includes the group of the special secondary emission monitors (SEM) for measurements of the background radiation with the very high levels. For an operational reliability of such monitors, one of the basic requirements to the SEM design is the vacuum keeping better than 10^{-7} atm during the period of 20 years without external pumping. With this goal, in particular, an outgassing of SEM is carried out on the vacuum stands in CERN and IHEP.

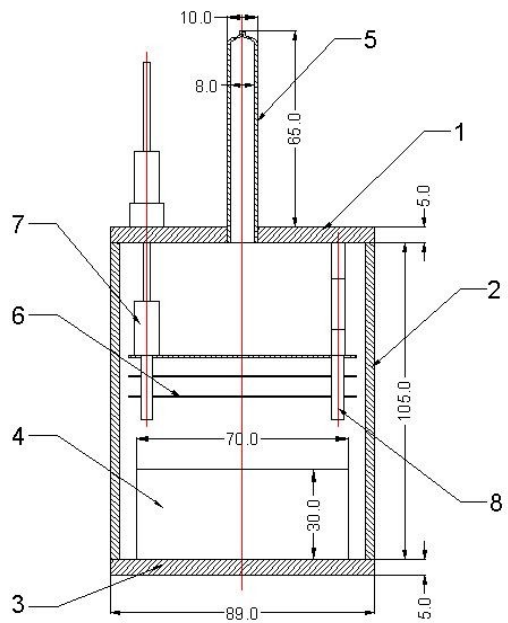
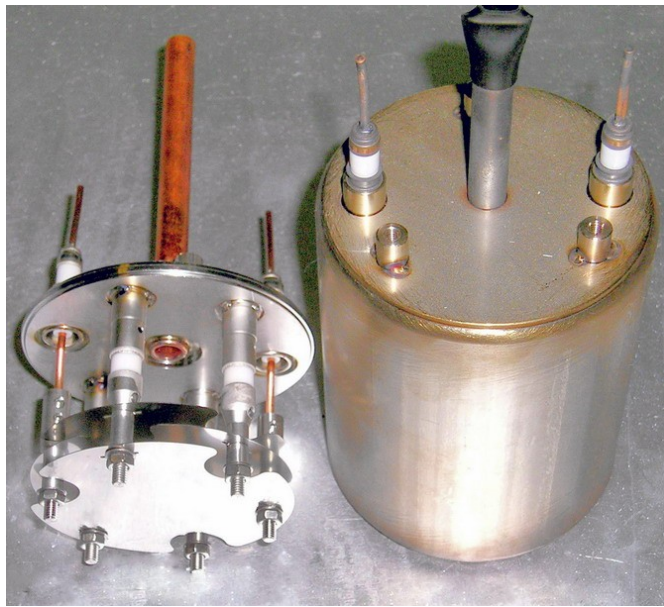
The results of numerical simulation of the diffusion of H_2 into the SEM vacuum chamber walls for the different technological stages of the outgassing and operating conditions are presented in this paper. The time dependences of all diffusion parameters and degassing flux from the chamber surface are obtained in accordance with vacuum-temperature regimes of the bakeout, pinch off and operation. Activation of the st707 getter inserted in the SEM during of bakeout on the IHEP stand and the getter pumping efficiency after pinch off are analyzed. These calculations allow to determine¹ the optimum temperature and pressure for the SEM pinch off. These parameters equal of $473 \pm 20^\circ K$ and $(2-4) \cdot 10^{-13}$ atm, accordingly. It is shown also that the getter can guarantee the main vacuum requirement to the H_2 content in the chamber for the 20 years operation.

Введение

Важной составной частью системы мониторинга потерь пучка на большом адронном коллайдере LHC в ЦЕРНе является комплекс из 350 вторично-эмиссионных мониторов SEM (Secondary Emission Monitor) [1,2], предназначенных для использования в местах с наиболее высокими уровнями радиации (коллиматоры, инжекция, поглотители и др.). Такого типа мониторы нашли широкое применение в системах диагностики пучков на различных ускорителях благодаря простоте их обслуживания [3]. Контроль локализованных потерь пучка с помощью SEM осуществляется измерением величины фоновой радиации. При этом непосредственно измеряемой величиной является ток вторичных электронов, эмитируемых под действием радиации из плоских электродов SEM. Электроды должны находиться в достаточно хорошем вакууме, сохранение которого является одним из важнейших условий для обеспечения надежной и продолжительной работы SEM. К вакуумной камере (ВК) монитора предъявляются следующие основные требования:

- отсутствие внешней откачки;
- сохранение рабочего вакуума в течение 20 лет;
- начальный вакуум не хуже 10^{-12} атм, а конечный – 10^{-7} атм;
- стойкость к радиационным нагрузкам 70 МГр/год.

Выполнение указанных и других требований к монитору представляет весьма сложную проблему, решение которой зависит от выбора конструкции и тщательной вакуумной подготовки SEM. Общий вид и компоновочная схема SEM показаны на рис. 1, а параметры его основных элементов приведены в табл. 1. ВК изготовлена из нержавеющей стали марки AISI 316L и состоит из двух частей – цилиндрической боковой стенки и 2 торцевых фланцев в виде дисков (элементы 1, 2 и 3 на рис. 1 и табл. 1).



а)

б)

Рис. 1. Общий вид (а) и компоновочная схема (б) SEM.

Вакуумная подготовка SEM практически включает полный набор всех применяемых средств и методов, из которых начальные осуществляются в ЦЕРНе, а завершающие – в ИФВЭ. К числу важнейших методов относятся методы теплового обезгаживания. Анализ и оптимизации условий теплового обезгаживания SEM посвящена настоящая работа. С этой целью проведено численное исследование влияния процессов диффузии на содержание и выделение H_2 из корпуса ВК при различных режимах теплового воздействия. Это было обусловлено тем, что водород является основным компонентом газовой выделению при высоком вакууме.

На основании опыта работы аналогичных мониторов и предварительных оценок ожидается, что количество H_2 , выделившегося из стенок вакуумной камеры и других элементов SEM за 20 лет, составит порядка $0.1-1 \text{ см}^3 \cdot \text{атм}$. Кроме того, будут выделяться и другие газы, в частности CO и CH_4 . Для поддержания требуемого вакуума ($<10^{-7} \text{ атм}$) при отсутствии откачки предполагается использовать геттер, параметры которого выбраны из условия достаточно эффективного поглощения CO и с учетом вынужденной радиационной десорбции газов. Хотя количество CO (как и CH_4) не превосходит количества H_2 , поглощение CO геттером характеризуется существенно меньшей скоростью и емкостью по сравнению с H_2 .

В SEM используется неиспаряемый геттер типа St 707 [4] в виде константановой ленты с активной массой на двух сторонах со следующими параметрами:

- | | |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| • Длина ленты | 32 см |
| • Ширина ленты | 3 см |
| • Удельное содержание активной массы | 0.2 г/см |
| • Удельная сорбционная емкость для H_2 | $13.16 \text{ см}^3 \cdot \text{атм} / \text{г}$ |
| • Полный вес активной массы | 6.4 г |
| • Полная сорбционная емкость для H_2 | $84.2 \text{ см}^3 \cdot \text{атм}$ |

Таблица 1. Параметры элементов SEM

№ эл-та	Наименование	Кол-во, шт.	Материал	Площадь, F [см ²]	Толщина, Н [см]
1	Верхний фланец	1	AISI 316L	56,7	0.5
2	Боковая стенка	1	AISI 316L	280	0,2
3	Нижний фланец	1	AISI 316L	56,7	0.5
	Скобы крепления геттера	2	AISI 304L	11,3	0.3
4	Геттер St 707+конст. L=32 см	1	Zr - V - Fe	170	0.02+pl
5	Трубка (l=7 см)	1	МБ	35,2	0.1
6	Электрод	3	Ti	37,0	0.05
7	Электроподвод	2	AISI 316L	3,8	0,25
	Крепеж электроподвода	2	AISI 316L	10,1	0,8/0,4
8	Трубчатый изолятор	3	Al ₂ O ₃		

В рамках настоящей работы выполнены расчеты для следующих технологических стадий вакуумной подготовки ВК до и после сборки монитора:

- Отжиг деталей камеры, осуществляемый в ЦЕРНе; $T_{max} = 900 - 950^{\circ}\text{C}$ (1200°K).
- Транспортировка деталей камеры из ЦЕРНа в ИФВЭ и сборка монитора в ИФВЭ; $T = 20^{\circ}\text{C}$ (293°K).
- Завершающее обезгаживание монитора и активизация геттера, осуществляемые в ИФВЭ; $T_{max} = 350^{\circ}\text{C}$ (623°K).

Наряду с активацией геттера при обезгаживании проведен детальный анализ гетерирования отсеченного монитора для всего предполагаемого периода его эксплуатации.

Методика расчета

Процесс диффузии моделировался в динамике – с учетом временной зависимости температуры камеры и давления H_2 на её внутренней и внешней поверхностях. В одномерном случае нестационарная диффузия газа в твердых телах описывается следующими двумя дифференциальными уравнениями (1 и 2 законы Фика) [5]:

$$q(x,t) = -D \cdot \frac{dC(x,t)}{dx} \tag{1}$$

$$\frac{dC(x,t)}{dt} = D \cdot \frac{d^2C(x,t)}{dx^2}$$

где q – скорость удельного потока газа, D – коэффициент диффузии, C – концентрация газа в материале, x – координата, t – время.

Для построения алгоритма численного моделирования использовался метод конечных разностей. При этом стенка вакуумной камеры разбивалась по толщине на отдельные зоны (слои). На рис. 2 схематически показано сечение участка стенки ВК с разбиением на зоны и обозначениями основных величин: H – толщина стенки, k – индексы зон, h_k – ширина зон, C_k – концентрация H_2 в зонах, P_m – внутреннее давление H_2 в ВК, P_a – давление H_2 на внешней поверхности ВК. Зоны h_0 и h_K имеют нулевую ширину и соответствуют внутренней и внешней поверхностям ВК.

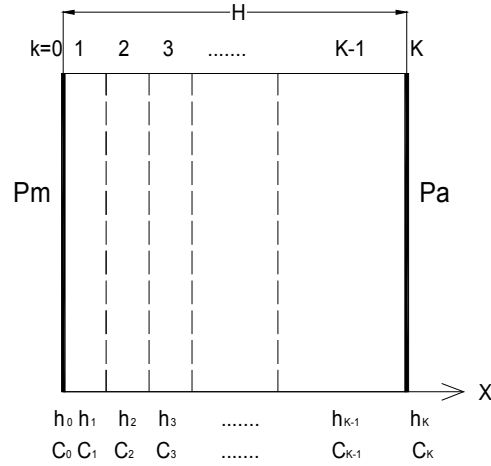


Рис. 2 Расчетная схема стенки ВК.

Полный рассматриваемый временной цикл t_c разбивался на последовательность элементарных конечных интервалов $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ ($n = 1, \dots, N$; $t_N = t_c$).

Для принятой расчетной схемы уравнения (1) преобразуются к следующим конечно-разностным выражениям:

$$q_{k,n} = -D \cdot \frac{C_{k,n} - C_{k-1,n}}{0.5 \cdot (h_{k-1} + h_k)} \quad (k=1, \dots, K),$$

$$\frac{C_{k,n+1} - C_{k,n}}{\Delta t_n} = \frac{(q_{k+1,n} - q_{k,n})}{h_k} \quad (k=1, \dots, K-1),$$

или в более удобном для расчетов виде:

$$C_{k,n+1} = C_{k,n} + \frac{(q_{k+1,n} - q_{k,n})}{h_k} \cdot \Delta t_n,$$

где $q_{k,n}$ – удельный поток H_2 на границе между зонами $k-1$ и k ; $C_{k,n}$ и $C_{k,n+1}$ – концентрации H_2 в начале и в конце интервала времени Δt_n .

Скорости потока H_2 на внутренней и внешней поверхностях ВК, которым в расчете соответствовали границы с индексами $k=0$ и $K+1$ поверхностных зон, принимались равными $q_{0,n} = q_{1,n}$ и $q_{K+1,n} = q_{K,n}$. После расчета значений $C_{k,n+1}$ для всех зон описанный цикл расчетов повторяется для следующего интервала времени Δt_{n+1} :

$$q_{k,n+1} = D \cdot \frac{C_{k,n+1} - C_{k-1,n+1}}{0.5 \cdot (h_{k-1} + h_k)}$$

и т. д.

Таким способом рассчитывается вся последовательность заданных интервалов времени. Необходимые для начала вычислительного процесса ($n=1$) значения $C_{k,1}$ задаются исходя из

свойств и предварительной подготовки используемого материала. Для поверхностных зон ($k=0$ и K) значения концентрации рассчитываются по формуле Генри [5]:

$$C = s \cdot P^{0.5}, \quad (3)$$

где s – коэффициент растворимости H_2 в материале, P – давление H_2 равное P_m и P_a на внутренней и внешней поверхностях ВК, соответственно. Значения C_0 и C_K являются граничными условиями решаемой задачи. Для проведения расчетов по формуле (3) предварительно определяется значение коэффициента s , который, как и коэффициент D , существенно зависит от температуры и материала. Температурная зависимость D и s имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} D &= D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_D}{2RT}\right) \\ s &= s_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_S}{2RT}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

где E_D и E_S – энергии активации при диффузии и растворении, D_0 и s_0 – постоянные коэффициенты, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура. Значения E_D , E_S , D_0 и s_0 определяются свойствами материала.

Необходимые для расчетов по формулам (3) и (4) значения T и P задаются в числе исходных данных задачи, причем T и P могут быть функциями времени. В последнем случае D , C_0 и C_K рассчитываются для каждого интервала времени.

Описанный алгоритм численных вычислений позволяет смоделировать процессы диффузии газов в одном расчетном цикле для всей отдельной технологической стадии обезгаживания, а при необходимости – и нескольких последовательных стадий. После сборки SEM и последующей его температурной обработки наряду с обезгаживанием всех внутренних элементов осуществляется активация геттера. При активации геттер переводится в исходное рабочее состояние с минимальным начальным содержанием сорбированных газов. Эффективность геттера существенно зависит от вакуумно-температурных условий процесса активации, что фактически определяет выбор режима термообработки SEM на этой стадии.

Одной из основных характеристик геттера является скорость сорбции газов, зависящая от рода, температуры и количества сорбированного газа [4]. Для взаимозависимости указанных параметров в расчетах геттерирования H_2 до и после отсоединения SEM от вакуумной системы использовалось следующее соотношение:

$$\lg(q_G) = 2.584 - 152/T - (9.942 \cdot 10^{-2} + 9.193 \cdot 10^{-2} \cdot Q_G^{0.5}) \cdot \lg(Q_G), \quad (5)$$

где q_G – в $[cm^3_{H_2} / (cm_G^2 \cdot s)]$, Q_G – в $[cm^3_{H_2} \cdot \text{Тор} / cm_G^2]$ и T – в $[^\circ K]$.

Это соотношение получено аппроксимацией семейства кривых для таких зависимостей из сертификата SAES [4]. Применимость соотношения (5) ограничивается, во-первых, емкостью геттера ($10^4 cm^3 \cdot \text{Тор}/г$) и, во-вторых, возникновением равновесного состояния между давлением и количеством адсорбированного H_2 . Связь между равновесными значениями P^* и Q_G^* определяется уравнением вида [6]:

$$\lg(P^*) = 5.14 - 6250/T + 2 \cdot \lg(Q_G^*), \quad (6)$$

где P^* – в [мбар], Q_G^* – в [л · мбар / г] и T – в [°К].

Геттер адсорбирует H_2 в следующих случаях: при $Q_G < Q_G^*$ для заданного давления $P = P^*$ и при $P > P^*$ для заданного (известного) количества $Q_G = Q_G^*$. В противоположных случаях будет происходить десорбция H_2 , т.е. скорость S_G меняет знак, что соответствует процессу активации геттера.

Результаты расчетов

Как следует из вышеизложенного, достоверность расчетов, прежде всего, зависит от знания входящих в выражение (4) констант, характеризующих свойства нержавеющей стали AISI 316L, из которой изготовлена ВК. Ввиду отсутствия соответствующих спецификаций для этой стали, использовались разрозненные данные из ряда препринтов и статей [7-9]. Неполнота этих данных компенсировалась предположениями, основанными на общих теоретических представлениях [10-11]. В проведенных расчетах для D и C использовались выражения в виде:

$$D = 0.0058 \cdot \exp\left(-\frac{12870}{RT}\right),$$

$$C = 193 \cdot \exp\left(-\frac{1311.8}{T}\right) \cdot P^{0.5},$$
(7)

где D – в [см²/с], C – в [см³_{H₂} · атм / см³с], p – в [атм], R – в [кал/моль] и T – в [°К].

Главными целями расчетов были, во-первых, исследование диффузионных процессов при обезгаживании монитора на вакуумном стенде ИФВЭ и, во-вторых, оценка эффективности геттера в обеспечении необходимого вакуума в отсеченном мониторе на протяжении всего срока его эксплуатации. Расчеты для предыдущих технологических стадий проводились, главным образом, для определения содержания H_2 в ВК перед завершающей стадией обезгаживания. Поскольку конкретные условия проведения отжига и транспортировки были неизвестны, то зависимости температуры и вакуума от времени моделировалась таким образом, чтобы получить минимальное содержание H_2 в ВК. Значения T и P брались приблизительно такими же, какие использовались при тепловой обработке стали 316L в работе [8]. Процесс подъема температуры при отжиге не рассматривался, поскольку он практически не влияет на конечный уровень концентрации H_2 в стали. Предполагалось, что начальная концентрация H_2 по всей толщине стенки однородна и равна $C_0 = 1.56 \cdot 10^{-3}$ см³_{H₂} · атм / см³с, что соответствует предельному (насыщенному) значению при $T=293^{\circ}\text{C}$ и $P_a = 5 \cdot 10^{-7}$ атм (парциальное давление H_2 в атмосфере). При этом полное количество H_2 в боковой стенке ВК равно $Q_0 \approx 0.0875$ см³ · атм.

В ходе единого расчетного цикла задавалась последовательность интервалов времени, охватывающая весь рассматриваемый период отжига. Каждому интервалу времени приписывались свои значения T и P . Так как ВК целиком находилась в вакуумной печи, то значения T и P задавались одинаковыми для внутренней и внешней поверхностей ВК. О характерном времени обезгаживания при отжиге можно судить по приведенному на рис. 3 семейству кривых, иллюстрирующих распределение $C(X)$ по толщине боковой стенки для различных моментов времени при $P = 10^{-10}$ атм и $T = 1200^{\circ}\text{K}$ (максимальная температура отжига). На рис. 4 даны зависимости полных количеств H_2 в стенке от времени $Q(t)$ при $P = 10^{-10}$ и 10^{-11} атм.

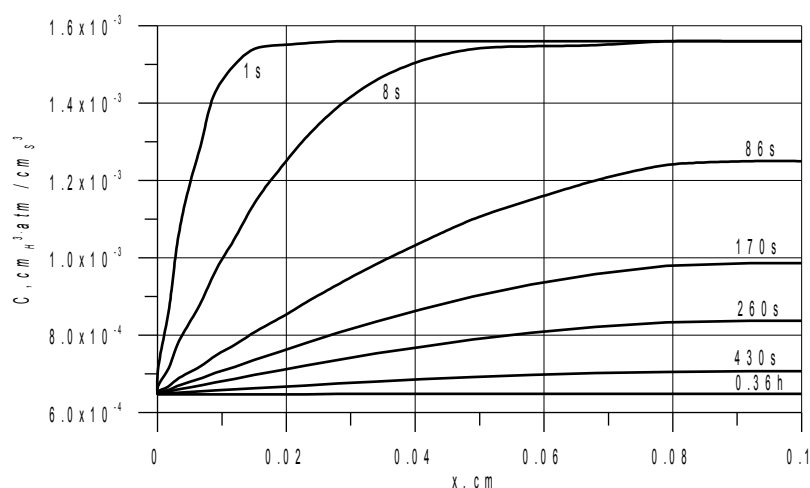


Рис. 3. Распределение концентрации H_2 по толщине боковой стенки ВК для различных значений времени отжига; $T=1200^\circ K$, $P = 10^{-10}$ атм.

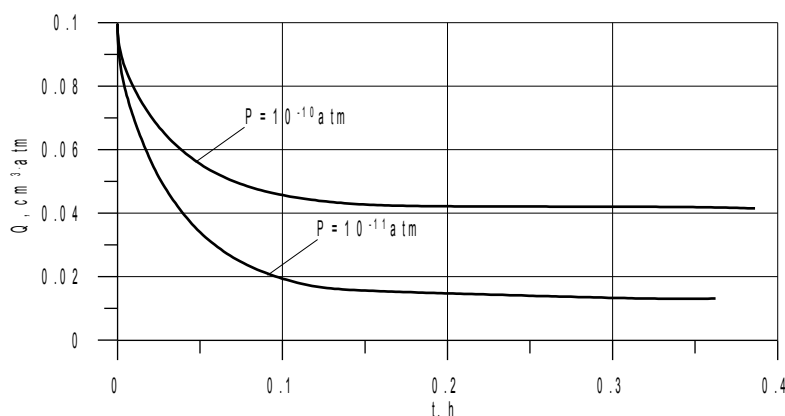


Рис. 4. Зависимость количества H_2 в боковой стенке ВК от времени отжига; $T=1200^\circ K$, $P = 10^{-10}$ и 10^{-11} атм.

Из рис. 3 и 4 следует, что величины C и Q достигают предельных минимальных значений примерно за 10 минут. Зависимость C_{min} от P приведена на рис. 5. Из этой зависимости видно, что при $T = 1200^\circ K$ для того, чтобы обеспечить $C_{min} < C_0$, давление H_2 должно быть ниже $5.5 \cdot 10^{-10}$ атм. Из аналогичных расчетов для фланцев ВК, толщина которых равна 5 мм, получается, что минимальные значения C и Q достигаются примерно за 1 час.

Результаты расчетов диффузионных процессов при отжиге приведены на рис. 6 в виде зависимостей T , P и Q от времени. Значения указанных величин и концентрации H_2 в средней плоскости стенки ($x = 0.1$ см) для последовательно сменяемых режимов приведены также в табл. 2. Из рис. 6 и табл. 2 следует, что достаточно эффективное выделение H_2 происходит при $P < 10^{-10}$ атм и $600^\circ K < T < 900^\circ K$. В конце стадии отжига (62.5 ч) количество H_2 в стенке снизилось примерно в 100 раз по сравнению с первоначальным.

Необходимо отметить, что расчеты режимов при $P > 5.5 \cdot 10^{-10}$ атм и $T = 1200^\circ K$ показали, что в этом случае H_2 не выделяется из стенки, а поглощается и величина Q может существенно превосходить начальную величину Q_0 .

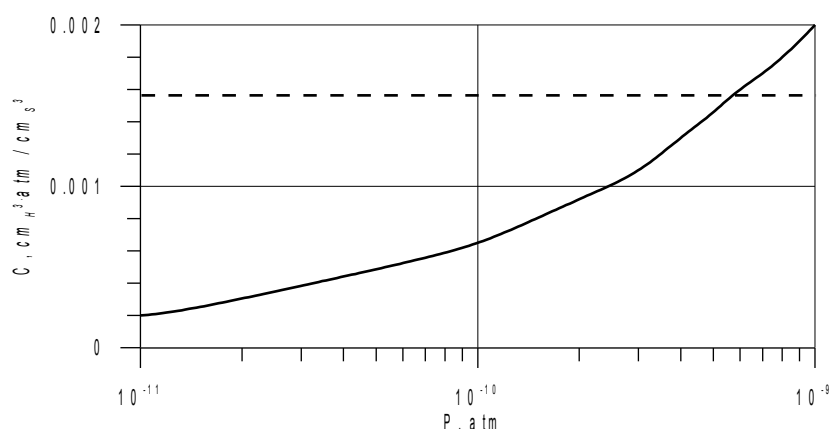


Рис. 5. Зависимость минимальной концентрации H_2 в боковой стенке ВК от давления H_2 при $T=1200^\circ K$. Штриховая линия соответствует концентрации C_0 .

На рис. 6 и в табл. 2 отражено также изменение перечисленных выше величин и для стадии транспортировки и сборки. В вычислениях для периода транспортировки и сборки мониторов принималось, что они находятся в непосредственном контакте с атмосферным воздухом ($P_a=5 \cdot 10^{-7}$ атм, $T=20^\circ C$) в течение 2 месяцев. За 2 месяца произошло поглощение H_2 , сосредоточенного в приповерхностных слоях стенки и увеличившего значение Q в 4 раза по сравнению с началом данной стадии.

Существенной особенностью завершающей стадии обезгаживания является то, что откачка газа осуществляется только из внутренней области вакуумной камеры монитора. Внешняя поверхность камеры контактирует с атмосферным воздухом при независимом от времени парциальном давлении H_2 . Различие граничных условий на поверхностях стенки будет обуславливать разные закономерности выделения H_2 из них. При этом газовыделение может чередоваться с поглощением H_2 . В этих условиях следует ожидать и весьма неоднородное распределение концентрации H_2 по толщине стенки. Вышеизложенное делает весьма актуальной оптимизацию режима обезгаживания для обеспечения минимальной концентрации H_2 в стенке и максимальной активации геттера к моменту отсечения монитора от вакуумной системы.

Таблица 2. Отжиг и транспортировка-сборка деталей монитора

Режим №	T [°K]	P [атм]	Время, [час]	Q_{H_2} [$cm^3 \cdot atm$]	C (X=0.1cm) [$cm^3_{H_2} \cdot atm / cm^3 s$]
Отжиг					
1	1200	$5 \cdot 10^{-10}$	10 мин	0.0812	$1.45 \cdot 10^{-3}$
2	1200	$4 \cdot 10^{-10}$	10 мин	0.0727	$1.30 \cdot 10^{-3}$
3	900	$2 \cdot 10^{-10}$	15 мин	0.0465	$9.41 \cdot 10^{-4}$
4	900	$5 \cdot 10^{-11}$	1 час	0.0182	$3.29 \cdot 10^{-4}$
5	900	$1 \cdot 10^{-11}$	1 час	$8.10 \cdot 10^{-3}$	$1.46 \cdot 10^{-4}$
6	600	$5 \cdot 10^{-12}$	20 часов	$3.16 \cdot 10^{-3}$	$6.05 \cdot 10^{-5}$
7	600	$2 \cdot 10^{-12}$	20 часов	$1.85 \cdot 10^{-3}$	$3.42 \cdot 10^{-5}$
8	600	$5 \cdot 10^{-13}$	20 часов	$0.94 \cdot 10^{-3}$	$1.76 \cdot 10^{-5}$
Транспортировка и сборка					
9	293	$5 \cdot 10^{-7}$	2 месяца	$3.86 \cdot 10^{-3}$	$1.76 \cdot 10^{-5}$

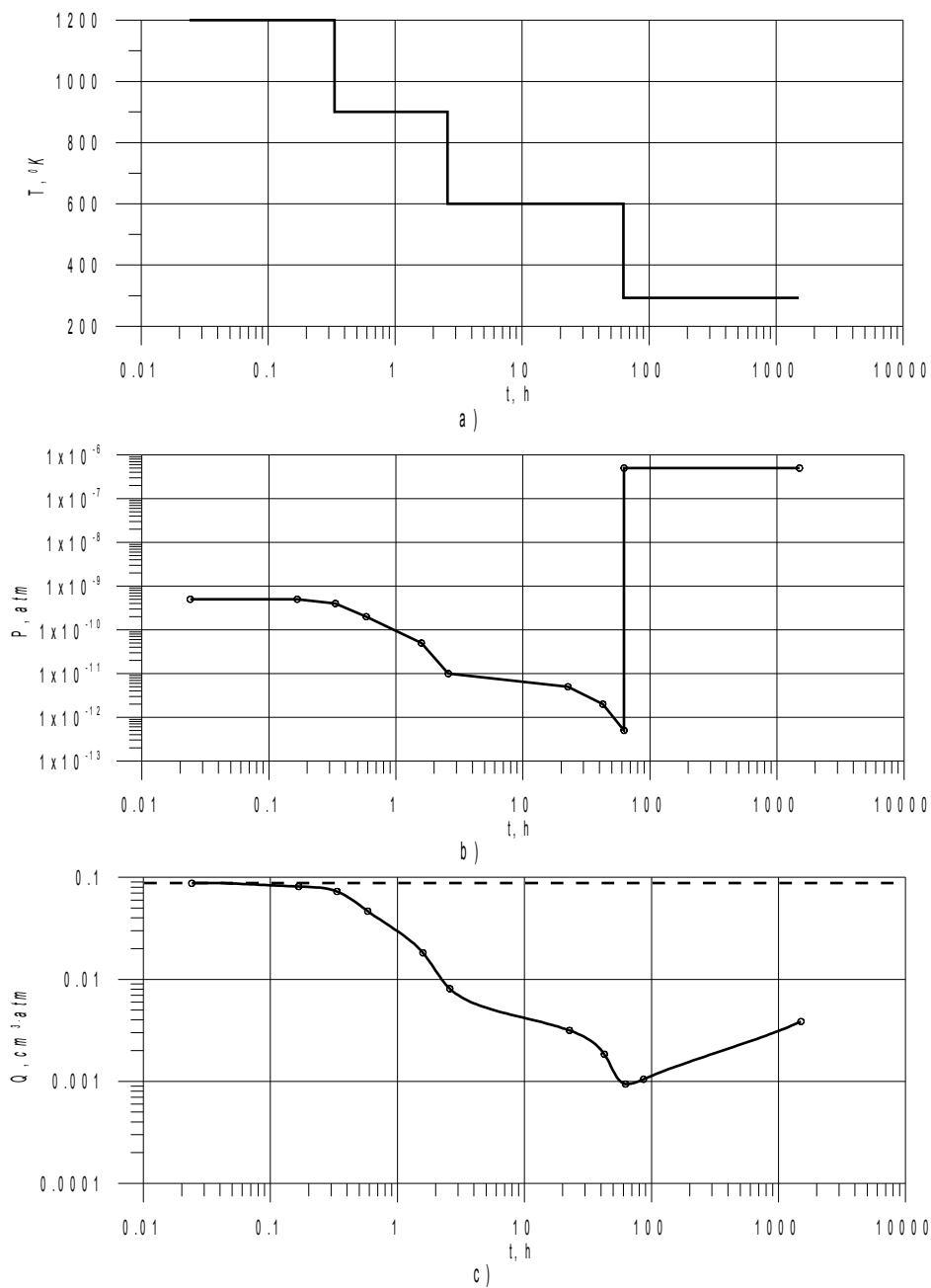


Рис. 6. Зависимость от времени температуры (а), давления H_2 (b) и количества H_2 (c) в боковой стенке ВК при отжиге и транспортировке. Штриховая линия соответствует Q_0 .

Диффузия H_2 при завершающем обезгаживании (после сборки монитора) рассчитывалась таким же методом, что и при отжиге. Вариация T осуществлялась в соответствии с температурным циклом, согласованным со специалистами ЦЕРНа (см. рис. 7). Вариация P во времени задавалась в соответствии с техническими характеристиками вакуумного стенда ИФВЭ [12].

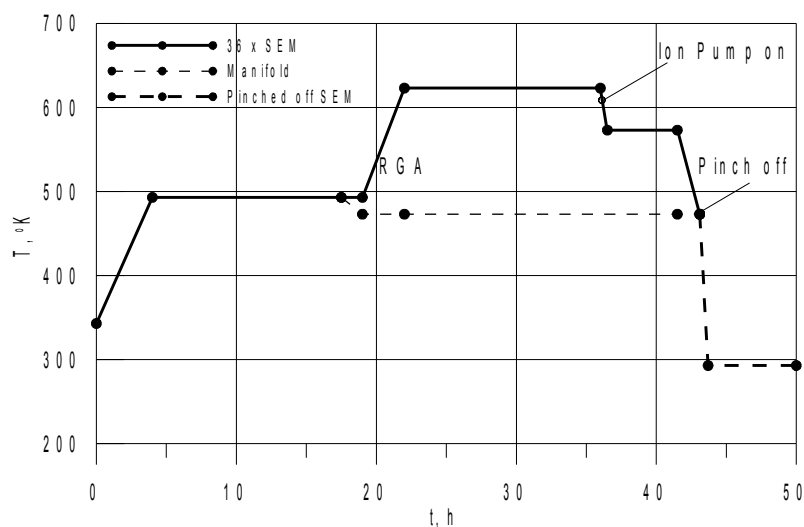


Рис. 7. Температурный цикл обезгаживания SEM на стенде ИФВЭ.

Начало цикла соответствует началу повышения температуры вакуумного стенда, а окончание – температуре 473°K в момент отсечения монитора от вакуумной системы. Изменение во времени задаваемых величин T и P_m , а также основных рассчитываемых величин – удельной скорости потока H_2 на внутренней поверхности боковой стенки ВК (q) и полного количества H_2 в стенке (Q) – дано в табл. 3 и представлено графиками на рис. 8a, b, c, и d. У всех графиков на рис. 8 шкала временных осей (абсцисс) одинакова, что позволяет определять взаимную корреляцию в изменении указанных величин. Наиболее существенные особенности представленных на рис. 8 зависимостей следующие:

- Ухудшение вакуума на 2 порядка в момент времени $t = 43$ ч при отсечении монитора (см. рис. 8b).
- Быстрый рост скорости газовыделения на протяжении всего «стола» при $T = 623^{\circ}\text{K}$ (см. рис. 8c).
- Значительное увеличение полного количества H_2 к концу температурного цикла (см. рис. 8d) – на 2 порядка по сравнению с началом цикла и в 5 раз по сравнению с начальным значением $Q_0 = 0.0875 \text{ см}^3 \cdot \text{атм}$.

Два последних эффекта связаны с разницей граничных условий на внутренней и внешней поверхностях ВК ($P_a \gg P_m$). Влияние этого фактора на характер распределения концентрации H_2 по толщине боковой стенки ВК иллюстрируется на рис. 9a и b семействами кривых для различных расчетных режимов (см. табл. 3). На рис. 9a приведено семейство кривых для режимов с подъемом температуры и $T = 623^{\circ}\text{K}$, а на рис. 9b – для режимов с понижением температуры. Из кривых на рис. 9 видно, что увеличение Q вызвано поглощением H_2 из атмосферы, а рост q при $T = 623^{\circ}\text{K}$ обуславливается формированием режима газопроницаемости стенки. В этом случае увеличение T будет приводить к экспоненциальному росту q и Q в соответствии с ростом коэффициентов D и S (4).

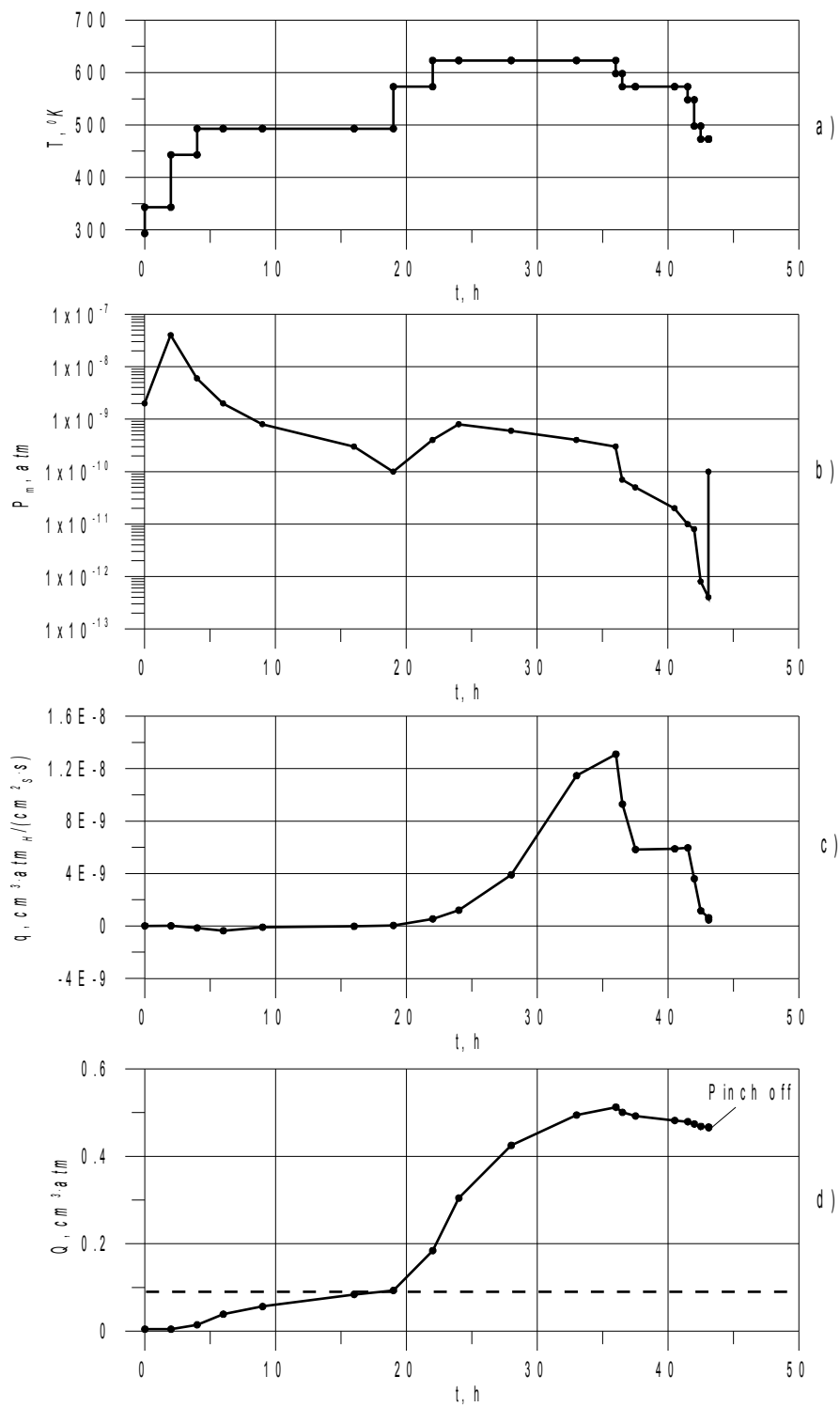


Рис. 8. Зависимость от времени температуры (а), внутреннего давления (б), скорости газовыделения (с) и количества H_2 (д) в боковой стенке ВК при завершающем обезгаживании. Штриховая линия соответствует Q_0 .

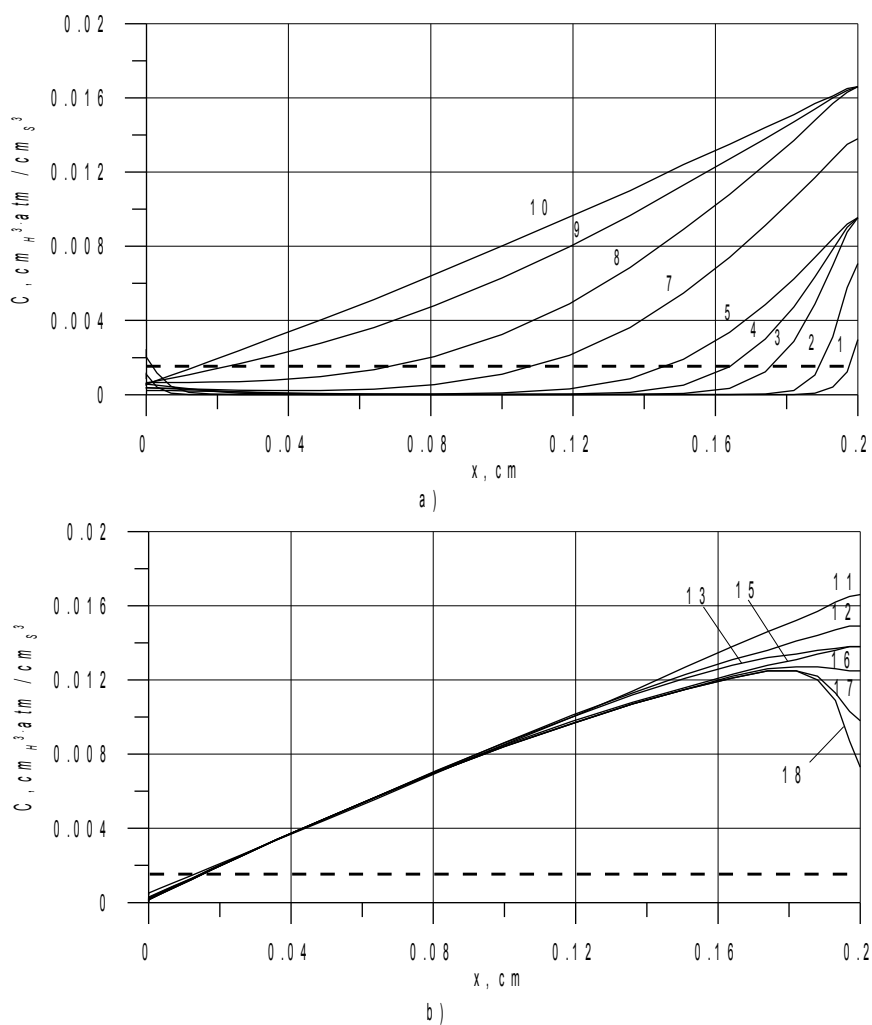


Рис. 9. Семейство кривых распределения концентрации H₂ по толщине боковой стенки ВК для различных режимов завершающего обезгаживания при повышении (а) и понижении (б) температуры (см. табл. 3). Штриховая линия соответствует концентрации C₀.

В табл. 3 и на рис. 10 даны зависимости концентрации H₂ от времени для 3 слоев по толщине стенки ВК (при X=0; 0.1 и 0.2 см от внутренней поверхности). Для SEM в рабочих условиях (отсутствие откачки и T = 293⁰К) наиболее существенным для сохранения вакуума является минимизация C во внутреннем приповерхностном слое стенки (X ≥ 0). Значение C в этой области к завершению обезгаживания получается на порядок меньшим, чем исходное значение (C₀ – горизонтальная линия), что приемлемо для нормальной работы SEM.

Таблица 3. Режим завершающего обезгаживания монитора после сборки

Режим №	Т [°K]	P _m [атм]	Время [час]	Q _{H2} [см ³ ·атм]	С [см ³ H ₂ ·атм / см ³ s]		
					X = 0	X = 0.1	X = 0.2
1	343	4 · 10 ⁻⁸	2	4.51 · 10 ⁻³	1.10 · 10 ⁻³	1.76 · 10 ⁻⁵	2.98 · 10 ⁻³
2	443	6 · 10 ⁻⁹	2	0.0145	6.86 · 10 ⁻⁴	1.76 · 10 ⁻⁵	7.07 · 10 ⁻³
3	493	2 · 10 ⁻⁹	2	0.0386	5.63 · 10 ⁻⁴	1.76 · 10 ⁻⁵	9.54 · 10 ⁻³
4	493	8 · 10 ⁻¹⁰	3	0.0566	3.72 · 10 ⁻⁴	1.93 · 10 ⁻⁵	9.54 · 10 ⁻³
5	493	3 · 10 ⁻¹⁰	7	0.0841	2.29 · 10 ⁻⁴	9.13 · 10 ⁻⁵	9.54 · 10 ⁻³
6	493	1 · 10 ⁻¹⁰	3	0.0931	1.37 · 10 ⁻⁴	1.69 · 10 ⁻⁴	9.54 · 10 ⁻³
7	573	4 · 10 ⁻¹⁰	3	0.184	3.83 · 10 ⁻⁴	1.10 · 10 ⁻³	0,0138
8	623	8 · 10 ⁻¹⁰	2	0.305	6.64 · 10 ⁻⁴	3.24 · 10 ⁻³	0,0166
9	623	6 · 10 ⁻¹⁰	4	0.425	6.26 · 10 ⁻⁴	6.29 · 10 ⁻³	0,0166
10	623	4 · 10 ⁻¹⁰	5	0.494	5.61 · 10 ⁻⁴	8.02 · 10 ⁻³	0,0166
11	623	3 · 10 ⁻¹⁰	3	0.512	5.11 · 10 ⁻⁴	8.52 · 10 ⁻³	0,0166
12	598	7 · 10 ⁻¹¹	0.5	0.504	2.91 · 10 ⁻⁴	8.62 · 10 ⁻³	0,0149
13	573	5 · 10 ⁻¹¹	1	0.494	2.54 · 10 ⁻⁴	8.61 · 10 ⁻³	0,0138
14	573	2 · 10 ⁻¹¹	3	0.482	2.14 · 10 ⁻⁴	8.49 · 10 ⁻³	0,0138
15	573	1 · 10 ⁻¹¹	1	0.479	1.80 · 10 ⁻⁴	8.44 · 10 ⁻³	0,0138
16	548	8 · 10 ⁻¹²	0.5	0.474	1.69 · 10 ⁻⁴	8.42 · 10 ⁻³	0,0125
17	498	8 · 10 ⁻¹³	0.5	0.468	1.47 · 10 ⁻⁴	8.42 · 10 ⁻³	0.0098
18	473	4 · 10 ⁻¹³	0.1	0.467	1.36 · 10 ⁻⁴	8.41 · 10 ⁻³	0.0073
19	473	1 · 10 ⁻¹⁰	0.008	0.465	1.37 · 10 ⁻⁴	8.41 · 10 ⁻³	0.0073
20	423	2 · 10 ⁻¹³					

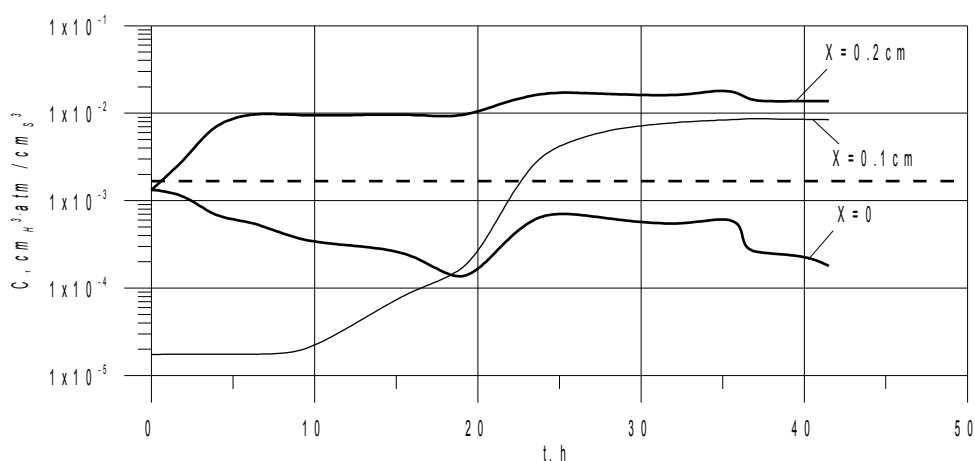


Рис. 10. Зависимость концентрации H₂ от времени в различных сечениях боковой стенки при завершающем обезгаживании ВК. Штриховая линия соответствует C₀.

При рассмотрении влияния геттера на вакуум в отсеченном SEM учитывались статические и кинетические характеристики сорбционных свойств геттера. Статические сорбционные свойства используемого геттера обобщены в виде семейств изотерм и изобар на рис. 11а и б, соответственно. Эти семейства кривых рассчитаны с помощью уравнения (6). Изотермы на рис. 11а отображают зависимости количества поглощенного H₂ (на 6.4 г массы геттера) от равновесного давления при различных значениях температуры. Отдельные точки на этом рисунке соответствуют значениям Q_G^{*} ряда рассчитываемых режимов при понижении температуры.

Цифры возле этих точек соответствуют номеру режима в табл. 3; горизонтальная линия показывает предельную емкость геттера. Изобары на рис. 11b отображают зависимости количества поглощенного H_2 от температуры при различных значениях равновесного давления. Из представленных на рис. 11 изотерм и изобар следует, что для отсечения SEM от вакуумной системы оптимальная температура (T_p) при $P_m \approx (2-4) \cdot 10^{-13}$ атм находится вблизи 473°K.

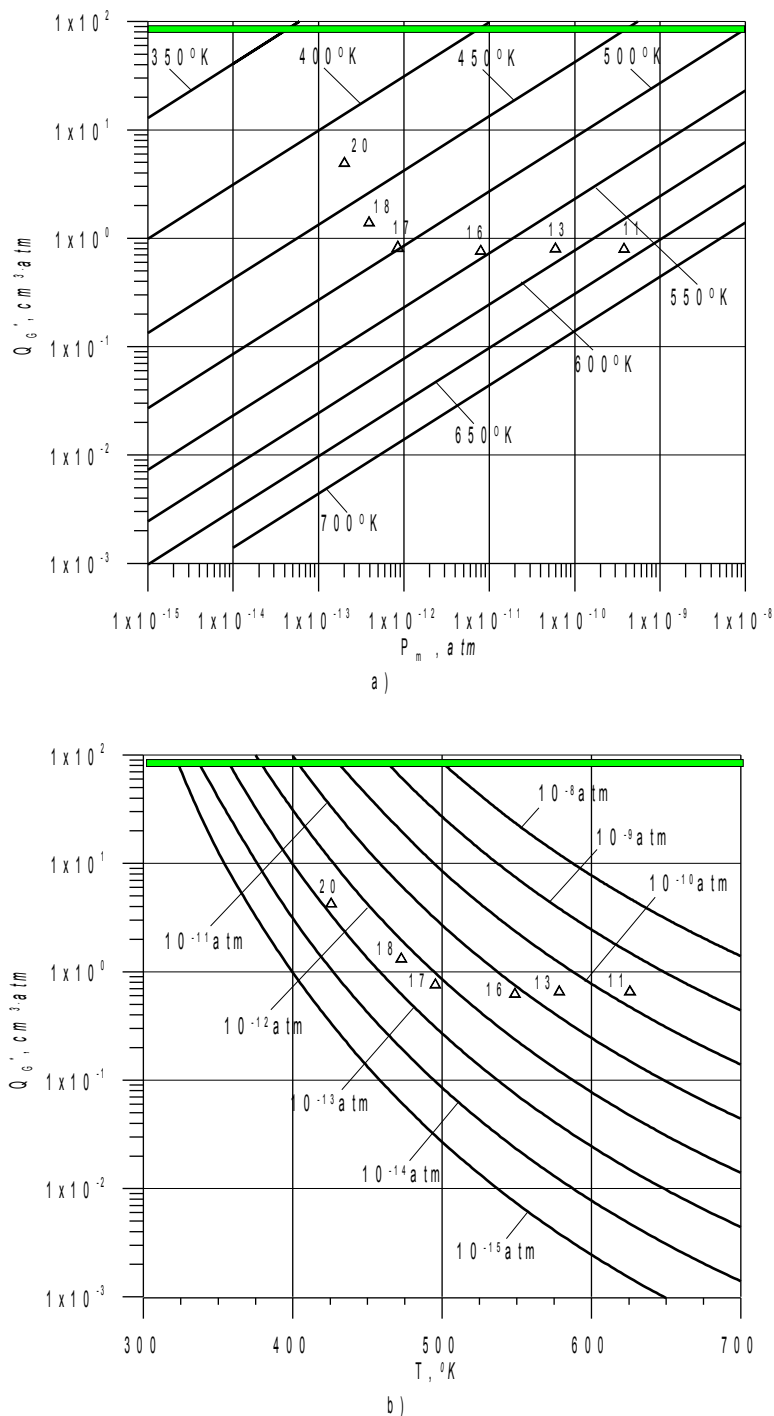


Рис. 11. Изотермы (а) и изобары (b) абсорбции H_2 геттером ST707.

Для более точного определения значения T_p наряду со статическими характеристиками учитывалась также кинетическая характеристика геттера в виде зависимости удельной скорости сорбции от поглощенного количества H_2 и температуры. С помощью формулы (5) определялось влияние скорости сорбции геттера на количество поглощенного H_2 (Q_G) в процессе обезгаживания монитора и давление H_2 в мониторе после его отсечения. В первом случае расчет проводился для интервала времени, соответствующего понижению температуры от $623^{\circ}K$ до $473^{\circ}K$ (рис. 7). При этом вариации T и P осуществлялись в соответствии с режимами, приведенными в табл. 3. Результат расчетов представлен на рис. 12 сплошной линией. Здесь же штриховой линией дана аналогичная зависимость для равновесного состояния геттера (Q_G^*). Значение Q_G^* рассчитывалось по формуле (6) для тех же режимов, что и предыдущая зависимость. Обе зависимости на рис. 12 практически совпадают во всем рассматриваемом интервале времени. Следовательно, в этом случае дополнительного поглощения H_2 геттером не происходит, что свидетельствует об оптимальном согласовании темпов понижения температуры с улучшением вакуума.

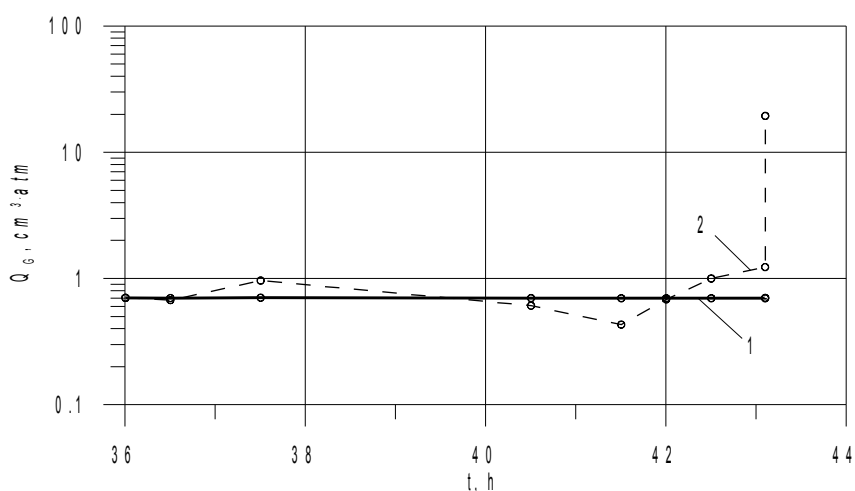


Рис. 12. Зависимость абсорбированного в геттере количества H_2 от времени при завершающем обезгаживании на стадии понижения температуры от $623^{\circ}K$ до $473^{\circ}K$ для конечной скорости поглощения (1) и равновесного состояния (2).

Такое согласование T и P нарушается при достижении $473^{\circ}K$ из-за того, что по техническим характеристикам вакуумный стенд не обеспечивает необходимого P . По этой причине при дальнейшем понижении температуры рассогласование T и P будет возрастать и приводить к ускоренному поглощению H_2 геттером. Данная закономерность подтверждает сделанный выше вывод о приемлемости температуры отсечения SEM вблизи $473^{\circ}K$. Учет, наряду с этим, резкого падения газовыделения элементов SEM с понижением T (положительный эффект) позволяет выбрать для оптимальной температуры отсечения интервал $423 - 473^{\circ}K$.

Состояние отсеченного SEM описывается графиками, представленными на рис. 13 и 14. Графики на рис. 13 отображают зависимости от времени температуры, давления, удельной скорости выделения H_2 и количества поглощенного геттером H_2 (за вычетом начального содержания H_2 в геттере). Зависимости охватывают период времени остывания SEM от $473^{\circ}K$ до комнатной температуры и достижения квазистационарного состояния ($\Delta t = 0 - 10$ ч). Из рис. 13а, б и с видно, что за время понижения температуры от $473^{\circ}K$ до $293^{\circ}K$ вакуум улучшается на 4 порядка, а газовыделение уменьшается на 3 порядка. На рис. 14 показано изменение давления, скорости газовыделения и количества поглощенного геттером H_2 на протяжении 20 лет. Величины P и q сохраняются практически постоянными – полученное в расчетах изменение этих

величин совпадает с погрешностью вычислений, достигающей 10% для $t = 2 \cdot 10^5$ ч. Зависимость поглощенного геттером количества H_2 от времени (рис. 13d и 14c) с большой точностью совпадает с количеством H_2 , выделяющегося из стенки.

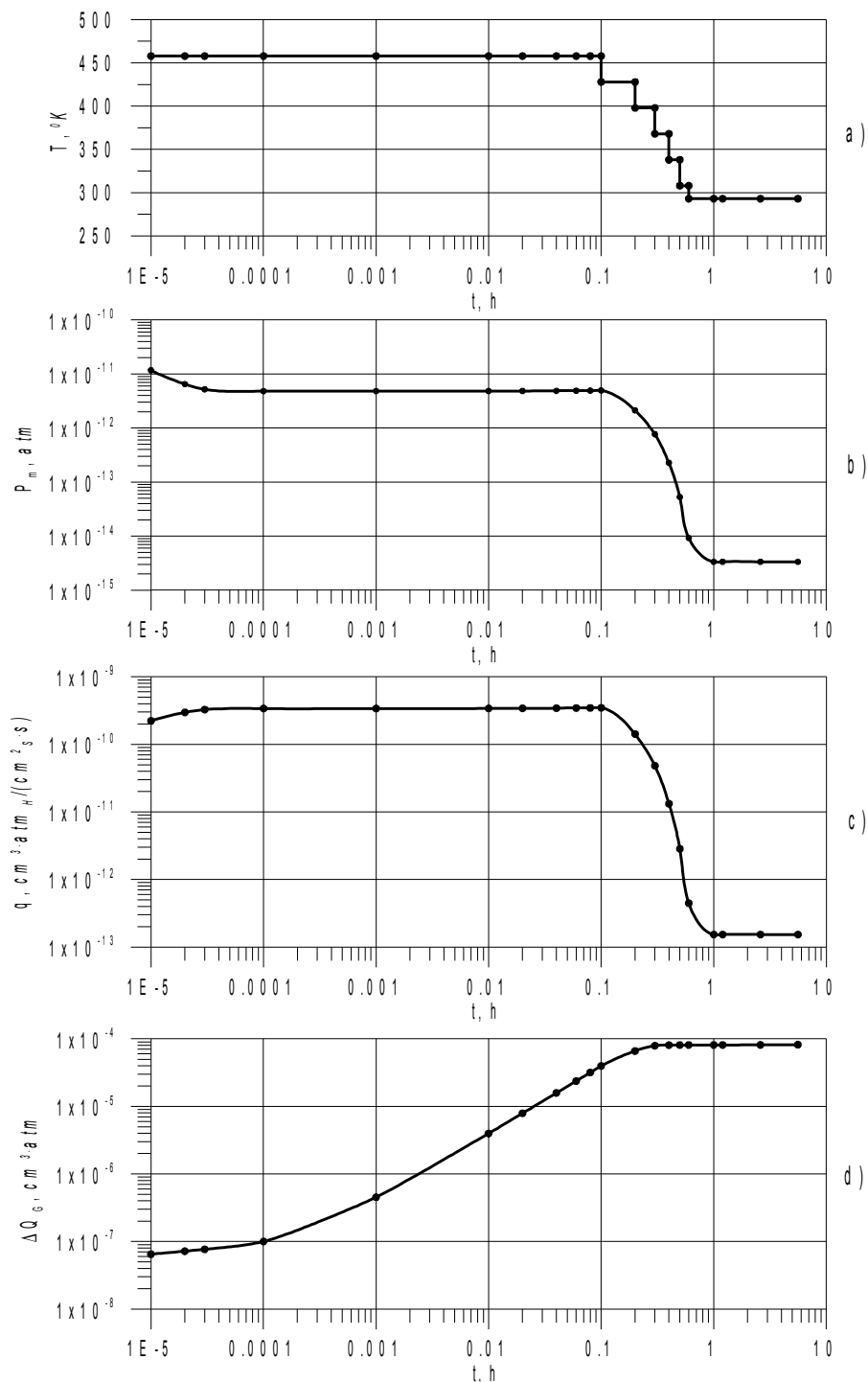


Рис.13. Зависимости от времени температуры (а), давления H_2 (b), удельной скорости газовыделения (с) и абсорбированного геттером H_2 (d) после отсечения SEM от вакуумной системы.

Полное количество H_2 , выделяемое всеми элементами монитора, может в несколько раз превышать предельные значения ΔQ_G на рис. 14с, а при радиационно-стимулированном газовойделении – даже на 1–2 порядка. Из оценочных расчетов следует, что установившееся давление в мониторе ($t > 1$ ч) пропорционально полному потоку газовойделения. Сорбционная емкость используемого в мониторе геттера позволяет поддерживать необходимый вакуум при газовойделении, превышающем почти на 3 порядка тот, который учитывался в проведенных выше расчетах.

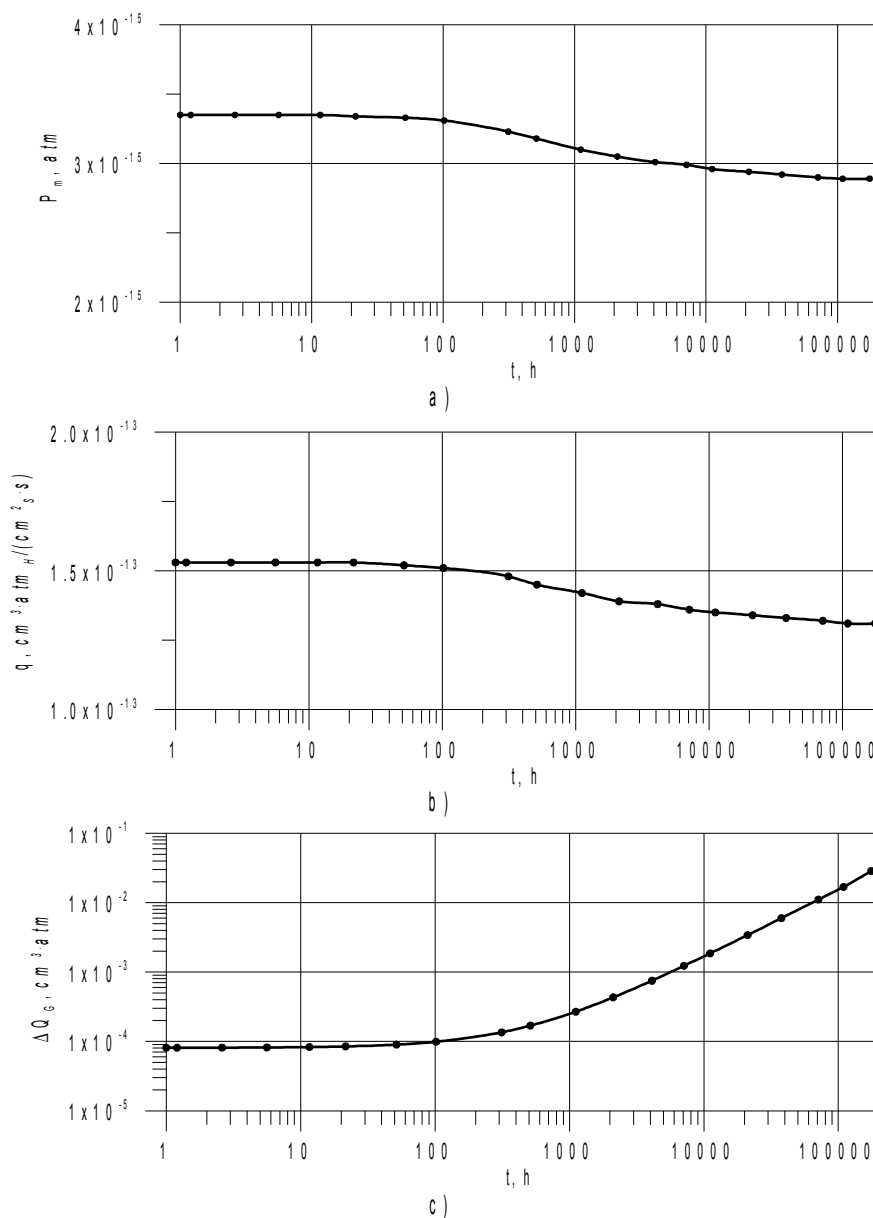


Рис. 14. Зависимости от времени давления H_2 (а), удельной скорости газовойделения (в) и абсорбированного геттером H_2 (с) в течение 20 лет при $T=293$ °К.

Заключение

Из результатов численного моделирования процессов диффузии H_2 в боковой стенке ВК вторично-эмиссионного монитора для различных процедур обезгаживания на вакуумных стендах, транспортировки, сборки и рабочего состояния (с учетом геттера) следует:

1. Отжиг, проводимый до сборки SEM при всестороннем вакуумировании деталей, обеспечивает наиболее эффективное удаление H_2 из всего объема стенки ВК с характерными временами диффузии порядка 0.1–1 час. Оптимальными для обезгаживания являются область температур 573–773°K и парциальное давление H_2 не хуже 10^{-13} атм.
2. После сборки монитора обезгаживание (на стенде ИФВЭ) происходит при одностороннем вакуумировании ВК. При повышении температуры это обстоятельство обуславливает интенсивное поглощение H_2 стенкой ВК с внешней поверхности, контактирующей с атмосферой. К окончанию обезгаживания количество поглощенного H_2 превышает в 5 раз исходное значение перед отжигом и на 2 порядка – после сборки монитора. Для уменьшения такого нежелательного эффекта можно рекомендовать использование покрытия с достаточно низким коэффициентом растворимости H_2 или защитной газовой «рубашки».
3. Распределение концентрации по толщине боковой стенки при достижении температуры 623°K становится существенно неоднородным. В конце «стола» с $T = 623^{\circ}K$ в стенке формируется режим газопроницаемости, что сопровождается значительным увеличением скорости удельного потока H_2 с внутренней поверхности стенки и полного количества H_2 в стенке. При этом значение концентрации H_2 во внутреннем приповерхностном слое стенки на 2 порядка ниже, чем во внешнем. С точки зрения содержания H_2 и скорости газовыделения оптимальными являются $T \approx 500^{\circ}K$ и давление H_2 не хуже 10^{-11} атм. Нагрев до температуры 623°K обусловлен требованиями к активации геттера, так как понижение этой температуры будет приводить к резкому увеличению начального содержания H_2 в геттере.
4. Из статических и динамических характеристик геттера следует, что содержание количества H_2 в геттере при завершении активации равно $0.7 \text{ см}^3 \cdot \text{атм.}$ (в конце «стола» с $623^{\circ}K$) и оптимальная температура для отсечения SEM от вакуумной системы лежит в пределах 423–473°K. При понижении температуры от 623°K до 473°K содержание H_2 в геттере практически не меняется и является начальным для отсеченного SEM.
5. После отсечения SEM от вакуумной системы и охлаждения его до комнатной температуры геттер улучшает вакуум от $1 \cdot 10^{-10}$ до $4 \cdot 10^{-15}$ атм. Геттер полностью поглощает весь водород ($\approx 0.1 \text{ в см}^3 \cdot \text{атм.}$), выделяющийся из стенки ВК в течение 20 лет. Предположительно, выделение H_2 от всех других элементов монитора может ухудшить вакуум не более, чем на 1–2 порядка.
6. Для более точной оценки ресурса работоспособности SEM проведенные расчеты процедур обезгаживания, газовыделения и геттерирования необходимо дополнить рассмотрением процессов формирования поверхностного адсорбционного слоя и радиационно-стимулированного выделения H_2 , что будет выполнено авторами в дальнейшем. Представляет также интерес провести аналогичное моделирование для других компонентов газа, влияющих на вакуум в SEMе.

Авторы статьи выражают глубокую благодарность К.Г. Мирзоеву за внимательное изучение представленных в работе результатов, уточнения и замечания.

Список литературы

- [1] E.A. Holzer et al. Beam Loss Monitoring System for the LHC. CERN-AB-2006-009 BI.
- [2] G. Guaglio et al. [Reliability of Beam Loss Monitors System for the Large Hadron Collider](#). ICFA HB2004, Bensheim, Germany; AIP Conf. Proc. 773, pp. 191-196, 2005.
- [3] S. Lapitsky, V. Rakhmatov, V. Seleznev. The Sealed Beam Intensity Monitors. – In “Proceedings of the Third European Particle Accelerator Conference”, Berlin Germany, 1992, vol. 2, pp. 1106-1108.
- [4] <http://www.saesgetters.com/default.aspx?idPage=212>
- [5] Г. Левин. Основы вакуумной техники. – М.: «Энергия», 1969, 272 с.
- [6] C. Benvenuti and P. Chigiato, J. Vac. Sci. Technol. A 14, 3278 (1996).
- [7] P. Chigiato. Vacuum calculation of TBID for CNGS. CERN -TS-Note-2006-002, Geneva.
- [8] R. Nuvolone. Technology of low-pressure systems-establishment of optimum conditions to obtain low degassing rates on 316L stainless steel by heat treatments. – J. Vac. Sci. and Techn., 1977, v. 14, № 5, p. 1210.
- [9] R. Nuvolone. Degassing rates of 316 L stainless steel as a function of different heat treatments. – In: Proceed. 7 th Intern. Vacuum Congress. – Vienna, 1977, v. 1, p. 219.
- [10] С. Дэшман. Научные основы вакуумной техники. – М.: Мир, 1964.
- [11] В.Б. Ершов, Г.Л. Саксаганский, Л.В. Филиппов. Вакуумные системы синхротронных ускорителей и ускорительно-накопительных комплексов. – Л., Обзор ОА-49. УЖД 621.384+621.52 1982.
- [12] В.Н. Асанов, Н.А. Галяев, В.Н. Гришин, А.В. Кошелев, А.В. Ларионов, В.С. Селезнев и др. Установка для вакуумной очистки и наполнения ионизационных камер (мониторов потерь пучка). – Инженерная физика, № 3, 2007, с. 1-5.

Рукопись поступила 10 июня 2008 г.

А.В. Ларионов и др.

Численное моделирование процессов диффузии водорода при обезгаживании вторично-эмиссионного монитора.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы Word.

Редактор Л.Ф. Васильева.

Подписано к печати	16.06.2008.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 2,625.	Уч.– изд.л. 2,1.	Тираж 80.	Заказ 48.
ЛР №020498	от 17.04.97.	Индекс 3649.	

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2008-7, ИФВЭ, 2008
