

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКА КОМПТОНОВСКИХ ГАММА-КВАНТОВ НА БАЗЕ НАКОПИТЕЛЯ НЕСТОР

*В.Г. Гревцев, А.Ю. Зелинский, И.И. Карнаухов, В.П. Козин, Н.И. Мочешников*

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
г. Харьков, Украина*

Рассмотрены условия получения давления  $\sim 10^{-10}$  Торр в камере реконструируемого накопителя НЕСТОР при использовании как сосредоточенных, так и распределенных средств откачки. Определены допустимые значения газовыделения как в процессе термодесорбции, так и десорбции под действием синхротронного излучения и выбран вариант расстановки средств откачки по периметру накопителя НЕСТОР. Создана высоковакуумная установка для исследования различных физико-химических способов получения чистых вакуумных поверхностей с удельным газовыделением менее

$$q \sim 10^{-11} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \text{ В установке получен вакуум } \sim 4 \cdot 10^{-10} \text{ Торр с удельным газовыделением } \sim 10^{-12} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$$

## ВВЕДЕНИЕ

На базе существующего накопителя электронов Н-100 на энергию 160 МэВ ведутся разработки мощного источника гамма-квантов, в котором используется эффект обратного комптоновского рассеяния лазерного излучения на релятивистских электронах [1]. Существующая инфраструктура и оборудование позволят поднять энергию циркулирующего пучка Н-100М (после реконструкции) до 225 МэВ. Общепринятая практика получения необходимого вакуума ( $\sim 10^{-10}$  Торр) в накопителях на большие (2...6 ГэВ) и на более низкие энергии (до 1 ГэВ) требует использования как сосредоточенных, так и распределенных средств откачки ввиду больших газовых потоков, стимулированных в основном синхротронным излучением (СИ). Хотя на установках с малой энергией действие СИ менее критично, некорректный учёт его действия может существенно затормозить процесс достижения проектных параметров [2].

## 1. ВЫБОР СХЕМЫ ОТКАЧКИ И ТРЕБОВАНИЙ К ВЕЛИЧИНЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ

В накопителе электронов НЕСТОР, который создается в ННЦ ХФТИ для генерации интенсивного пучка гамма-квантов в процессе обратного комптоновского рассеяния, время жизни циркулирующего пучка электронов при энергии  $\sim 60$  МэВ должно быть не менее 0.5 ч, а при более высокой энергии ( $\sim 225$  МэВ) – не менее 2 ч [1]. Для этого среднее динамическое давление в присутствии пучка электронов и синхротронного излучения не должно быть выше  $5 \cdot 10^{-9}$  Торр при длине орбиты  $L \sim 15$  м. Независимо от природы десорбции молекул газа давление  $P$  в камере будет определяться эффективной скоростью откачки  $S_{\text{эф}}$ , предельным давлением  $P_{\text{пред}}$  насосов и величиной суммарного газовыделения  $Q_0$ , основными составляющими которого являются величины тепловой  $Q_T$  и стимулированной  $Q_\gamma$  десорбции:

$$P = \frac{Q_0}{S_{\text{эф}}} + P_{\text{пред}} = \frac{Q_T + Q_\gamma}{S_{\text{эф}}} + P_{\text{пред}} \quad (1)$$

Схема накопительного кольца НЕСТОР изображена на рис. 1. Как показали расчёты сосредоточенной системы откачки, содержащей  $N$  насосов со скоростью откачки  $S_0$ , равномерно распределённых по длине камеры (т.е. расстояние между насосами  $L_0=L/N$ ), для получения давления  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$  Торр в камере накопителя, имеющей эллиптическое сечение с осями  $79 \times 27$  мм, вакуумная система накопителя должна иметь 8 точек откачки со скоростью откачки 150 л/с в каждой при предельной величине удельного газовыделения  $4.35 \cdot 10^{-11}$  Торр л/(см<sup>2</sup> с) [2].

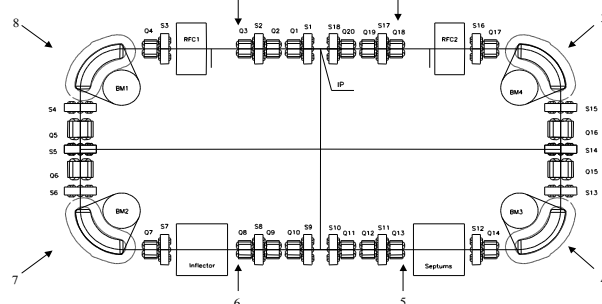


Рис. 1. Схема установки НЕСТОР; расположение насосов указано стрелками

Расчеты проводились как с использованием аналитических выражений, так и компьютерных программ. Для компьютерных расчетов была использована программа ВАКТРЕК [3]. На рис. 2 приведена рассчитанная на ЭВМ зависимость давления в камере от скорости откачки в каждой из 8 точек при величине удельного газовыделения  $q=4.35 \cdot 10^{-11}$  Торр л/(см<sup>2</sup> с). Выбор насосов со скоростью откачки  $S_0 > 150$  л/с нецелесообразен из-за ограниченной удельной проводимости камеры (см. рис. 2).

Давление [ $\text{Торр} \cdot 10^{-9}$ ]

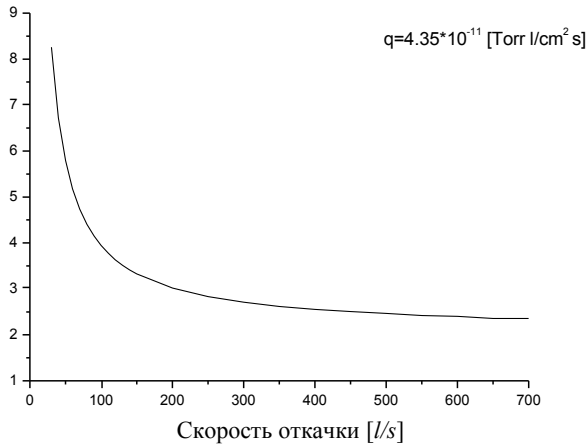


Рис. 2. Зависимость среднего давления в вакуумной камере накопителя НЕСТОР от скорости откачки насосов ( $N=8$ )

На рис. 3. изображены результаты расчетов распределения давления по длине вакуумной камеры накопителя НЕСТОР, проведенные программой ВАКТРЕК. Видно, что при скорости откачки  $S_0 = 150$  л/с, и удельном газовыделении  $q = 4,35 \cdot 10^{11} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$  среднее давление в камере накопителя будет  $P \approx 3,3 \cdot 10^{-9}$  Торр, а максимальное давление  $P_{\text{max}}$  при этом равно  $\sim 4 \cdot 10^{-9}$  Торр.

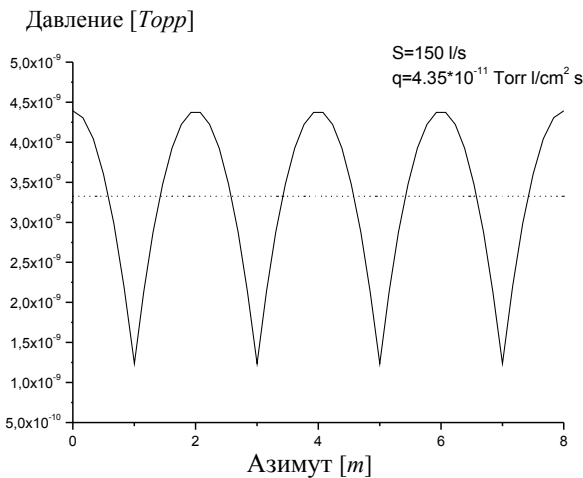


Рис. 3. Распределение давления вдоль камеры накопителя НЕСТОР ( $N=8$ )

В дипольных магнитах кроме термодесорбции существенным будет вклад радиационно-стимулированной десорбции из-за действия СИ, которая зависит от энергии циркулирующего пучка и его интенсивности. При токе 1 А и энергии пучка 300 МэВ газовыделение, связанное с СИ, будет равно [4]:

$$Q_{\text{си}} = 6,8\chi\eta \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент десорбции (молекулы/фотон);  $\chi$  – коэффициент, учитывающий зависимость числа фотонов СИ от энергии отсечки  $\epsilon_0$ , начиная с которой наиболее вероятен процесс выбивания молекул газа.

Значение коэффициента  $\chi$  для различных значений энергии пучка и двух значений  $1\epsilon_0=5$  и  $2\epsilon_0=10$  эВ приведено на рис. 4.

При  $E=300$  МэВ и  $2\epsilon_0=10$  эВ  $\chi=0,489952$  и

$$Q_{\text{си}} = 3,2\eta \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \quad (3)$$

или, учитывая площадь внутренней поверхности участков камеры в дипольных магнитах, удельное газовыделение под действием СИ

$$q_{\text{си}} \cong 5 \cdot 10^{-6} \eta \quad (4)$$

при  $q_{\text{си}}=q_0=10^{11} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ ;  $\eta \cong 9 \cdot 10^{-6}$  молекул/фотон.

Так как начальное значение  $\eta$  для нержавеющей стали обычно  $\sim 10^{-3}$  молекул/фотон, то для уменьшения влияния СИ на поворотных участках необходимо дополнительное увеличение скорости откачки. Для этой цели будут использованы распределенные насосы на основе NEG (неиспаряемых геттеров).

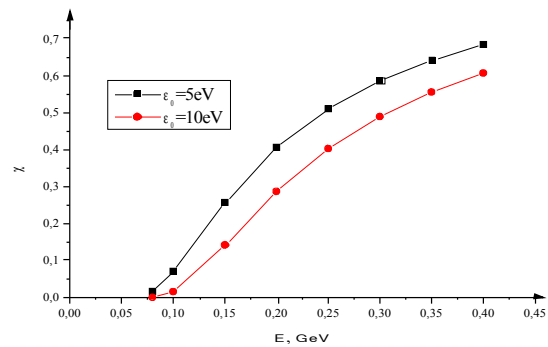


Рис. 4. Значение коэффициента  $\chi$  для различных значений энергии пучка и двух значений  $1\epsilon_0=5$  эВ и  $2\epsilon_0=10$  эВ

Расчеты показывают, что при использовании на каждом поворотном участке ленты NEG шириной 2 см и длиной  $\sim 80$  см при двустороннем напылении геттера возможно дополнительно иметь скорость откачки  $\sim 300$  л/с. Это позволит поддерживать необходимый на этих участках вакуум при  $\sim 20$ -кратном увеличении удельного газовыделения.

Для обеспечения среднего давления  $P \approx 3,3 \cdot 10^{-9}$  Торр в камере накопителя НЕСТОР при применении распределенной откачки насосами на основе нераспыляемых геттеров, нанесенных по всей длине камеры дипольных магнитов, суммарная скорость откачки должна быть равной 280 л/с при условии, что удельное газовыделение не будет превышать  $10^{-12} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ .

## 2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ВАКУУМНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В ННЦ ХФТИ разрабатываются NEG, состоящие из сплава нескольких геттероспособных материалов, нанесенных на несущую металлическую подложку [5]. После их активации в вакуумном объёме (для этого подложку следует нагреть на какое-то время до определенной температуры) NEG при хорошем вакуумном окружении (малое газовыделение) способен долгое время сохранять эффективную откачную способность для многих газов (кроме благородных и углеводородов). Так при

$q \sim 10^{-12} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$  эффективность NEG может сохраняться несколько месяцев и может быть повторно (много раз) восстановлена, но уже при более низкой температуре нагрева.

Нами для исследования откачной способности NEG выбраны сплавы: Zr, V, Fe (St707) с температурой активации  $\sim 400^\circ\text{C}$  и Zr, V, Ti с температурой активации  $\leq 200^\circ\text{C}$ . Исследован металлографический сплав St707 (75%Zr, 19,6%V, 5,4%Fe) и элементный состав покрытия этого сплава на подложках из никеля и нержавеющей стали методом спектрометрии обратного резерфордовского рассеяния протонов и ионов гелия (RBS) и методом спектрометрии рентгеновского характеристического излучения, возбуждаемого протонами (PIXE) на ускорителе «Сокол» ННЦ ХФТИ [6]. Полученные данные по химическому составу на электронном микроскопе хорошо согласуются с данными, полученными методами PIXE и RBS. В настоящее время изготовлен катод и проводятся исследования сплава 20%Zr, 50%V, 30%Ti, имеющего более низкую ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ) температуру активации.

Для исследования вакуумных свойств различных конструкционных материалов, средств откачки и измерения, технологических и физических процедур чистки вакуумных поверхностей создан вакуумный стенд. Его блок-схема приведена на рис. 5.

Основными узлами установки являются две вакуумных камеры А и Б, разделенные диафрагмой с проводимостью  $U=0,324 \text{ л/с}$ . Камера А имеет объём  $\sim 41 \text{ л}$ , поверхность  $\sim 10210 \text{ см}^2$ , камера Б –  $V_B=0,8 \text{ л}$  и  $S_B=662 \text{ см}^2$ .

Для откачки на установке имеются насосы: форвакуумный и турбомолекулярный с азотными ловушками, диодный и триодный магниторазрядные, три последовательно соединенных ленты NEG (St707) шириной 2 см и общей длиной активной части  $\sim 50 \text{ см}$ .

Для измерения давления используются термомпарные, ионизационные и магниторазрядные преобразователи. Спектр остаточных газов измеряется масс-спектрометром МХ-7304. Для активации NEG используется омический нагрев от источника тока до 50 А. Температура нагрева контролируется двумя термопарами. Для достижения малого удельного га-

завыделения ( $\leq 10^{-11} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ ) на установке использовались элементы и узлы, прошедшие (частично) электрополировку, химическую очистку растворителями (углеводородными), мойку в дистиллированной воде с последующей горячей сушкой и т.д. Все уплотнения металлические (в основном медь).

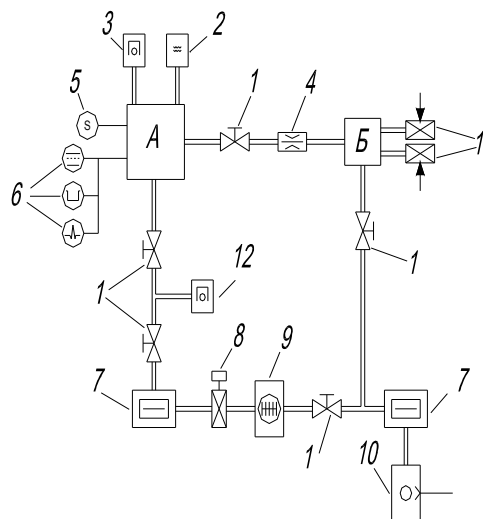


Рис. 5. Блок-схема вакуумной установки:  
1 – ручной клапан; 2 – неиспаряемый геттер (NEG); 3 – трион; 4 – калиброванная диафрагма; 5 – масс-спектрометр; 6 – манометрические преобразователи; 7 – азотные ловушки; 8 – управляемый клапан; 9 – турбомолекулярный насос; 10 – форвакуумный насос; 11 – натекатели; 12 – насос магниторазрядный диодный

Кроме того, предусмотрена чистка вакуумной камеры тлеющим разрядом в смеси 90%Ne+10%O<sub>2</sub> или 90%Ar+10%O<sub>2</sub>. Для этого используются имеющиеся на установке различные тоководы, в том числе и разрядные насосы, на которые подается напряжение до +500 В. Предусмотрена возможность прогрева основных узлов установки до 200...300 °С.

Для измерения скорости откачки используется метод двух манометров (в камерах А и Б). Поток газа из камеры Б (для регулировки этого потока имеются натекатели) через диафрагму с известной проводимостью  $U$  будет равен

$$Q=U \cdot (P_B - P_A), \quad (5)$$

где  $P_B$  – давление в камере Б;  $P_A$  – давление в камере А.

Также в камере А необходимо учитывать поток собственного газовыделения  $Q_A$ . Легко показать, что скорость используемых вакуумных насосов в камере А будет

$$S = U \left( \frac{P_B}{P_A} - 1 \right) + \frac{Q_A}{P_A}. \quad (6)$$

При плохом вакууме (большом потоке  $Q$ ) вторым членом можно пренебречь, но при высоком вакууме, когда поток  $Q$  мал и давление в камере А

определяется предельными давлениями откачных устройств (магнитоэридные насосы, NEG), этот член играет определяющую роль. Величина  $Q_A$  определяется экспериментально при измерении натекания.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На установке использовались высоковакуумные насосы диодного и триодного типа, бывшие ранее в длительной эксплуатации, и турбомолекулярный насос (ТМН).

Были исследованы процессы откачки установки в различных режимах: периодическом (односменная работа), непрерывном (в течение нескольких суток), без жидкого азота в триодном насосе (ТРИОН) и с ним, без прогрева всей системы и с прогревом до 200 °С, без чистки и с чисткой тлеющим разрядом в смесях аргона и гелия с кислородом.

На рис. 6 показаны зависимости  $P=f(t)$  для цикла односменной работы.

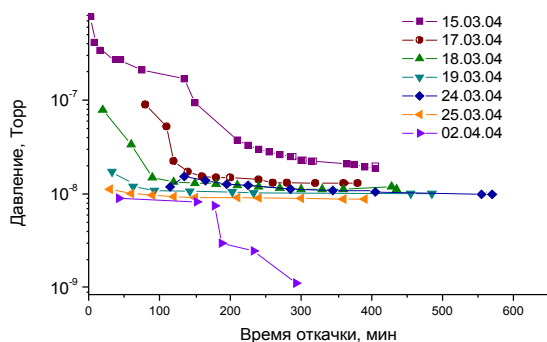


Рис. 6. Зависимость давления от времени при односменной работе, 02.04.04 залит жидкий азот

При периодической откачке предельно достижимый вакуум улучшается от смены к смене, также несколько увеличивается скорость откачки насосов, но прогресс крайне ограничен.

Это связано с тем, что магнитоэридные насосы, имеющие длительный срок эксплуатации, обладают «памятью», и чтобы начать откачку с оптимальными характеристиками во время запуска, им надо более продолжительное время, чем для «свежих» насосов для создания распыленного поглощающего слоя титана. Во время перерыва в работе, когда остаточное давление становится высоким ( $\sim 10^{-6} \dots 10^{-5}$  Торр), происходит деградация откачивающих свойств, и весь процесс откачки надо начинать с более худших условий, нежели они были в конце предыдущей смены.

В режиме непрерывной откачки ( $\sim 3$  сут) после прогрева в течение 20 ч всей системы до 180 °С достигнуто давление  $P_{\text{пред}} \sim 1 \cdot 10^{-9}$  Торр без жидкого азота в ТРИОН и скорость откачки 38 л/с при этом давлении, а с жидким азотом  $\sim 3,7 \cdot 10^{-10}$  Торр и скорость откачки  $\sim 125$  л/с при этом давлении. Таким образом, заливка жидкого азота существенно улучшает предельное давление и повышает скорость

откачки при этом предельном давлении. Пребывание в дальнейшем системы при остаточном давлении  $\sim 10^{-6} \dots 10^{-5}$  Торр ( $\sim 16$  ч) практически приводит к деградации скорости откачки насосов (магнитоэридных) и соответственно увеличивается предельно достижимое давление. Удельное газовыделение после ряда циклов откачки (как непрерывных, так и периодических) равно  $\sim 1,5 \cdot 10^{12} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ .

Анализ парциального состава остаточного газа показал, что при предельных давлениях ( $\sim 10^{-9} \dots 10^{-10}$  Торр) в вакуумном объеме ( $\sim 73$  л) содержится до 40% углеводородов с массой до  $\sim 150$  а.е., при наличии же жидкого азота в ТРИОН их количество уменьшается до  $\sim 5\%$  при неработающем ТРИОН (залит только жидкий азот) и до  $\sim 17\%$  при включении ТРИОН.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что для получения стабильного сверхвысокого вакуума ( $\sim 10^{-9} \dots 10^{-10}$  Торр) в НЕСТОР необходимо:

- использовать магнитоэридные насосы типа НМД и ТРИОН, не бывшие в длительной эксплуатации;
- непрерывный режим откачки;
- при подготовке вакуумных поверхностей узлов и элементов НЕСТОР желательно исключить использование углеводородных растворителей;
- в качестве основного конструкционного материала для вакуумной камеры использовать нержавеющую сталь типа X18H10T с содержанием углерода  $C \leq 0,03\%$ ;
- разработать NEG с температурой активации  $\leq 200$  °С на основе Ti, Zr, V.

### ЛИТЕРАТУРА

1. E. Bulyak, P. Gladkikh et al. A compact X-ray source based on Compton scattering // *Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Rev. A*. 2001, № 467-468, p. 88–90.  
 2. V.G. Grevtsev, A.Yu. Zelinsky, I.I. Karnaukhov, N.I. Mocheshnikov. The analysis and choice of the system for attaining vacuum in a 300 MeV electron storage ring // *Problems of atomic science and technology. Series «Nuclear Physics Investigations» (41)*. 2003, №2, p. 126–130.  
 3. V. Ziemann. *Vacuum Tracking*. SLAC-Pub-5962, October 1992.  
 4. В.Г. Гревцев, А.Ю. Зелинский, И.И. Карнаухов, Н.И. Мочешников и др. Установка для исследования свойств нераспыляемого геттера // *ВАНТ. Серия "Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники" (13)*. 2003, №5, с. 51–54.  
 5. В.М. Ажажа, В.В. Брык, А.В. Гончаров, В.Г. Гревцев, Т.Г. Емлянинова, И.И. Карнаухов, Н.И. Мочешников. Получение и исследование состава нераспыляемого геттера на основе сплава циркония, ванадия и железа // *ВАНТ. Серия «Физика*

радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (83). 2003, №3, с. 113–116.  
6.В.Н. Бондаренко, Л.С. Глазунов и др. Аналитическая установка для ядерно-физических методов ана-

лиза //Научные ведомости (Белгородский университет). Серия «Физика». 2001, №2 (15), с. 86-92.

## РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВАКУУМНОЇ СИСТЕМИ ДЖЕРЕЛА КОМПТОНІВСЬКИХ ГАММА-КВАНТІВ НА БАЗІ НАГРОМАДЖУВАЧА НЕСТОР

*В.Г. Грєвцев, А.Ю. Зелінський, І.І. Карнаухов, В.П. Козін, М.І. Мочешніков*

Розглянуто умови одержання тиску  $\sim 10^{-10}$  Торр у камері реконструйованого нагромаджувача НЕСТОР при використанні як зосереджених, так і розподілених засобів відкачки. Визначено припустимі значення газовиділення як в процесі термодесорбції, так і десорбції під дією синхротронного випромінювання та вибраний варіант розміщення засобів відкачки по периметру нагромаджувача НЕСТОР. Створена високовакуумна установка для дослідження різних

фізико-хімічних способів одержання чистих вакуумних поверхонь з питомим газовиділенням менше  $q \sim 10^{-11} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ .

В установці отриманий вакуум  $\sim 4 \cdot 10^{-10}$  Торр з питомим газовиділенням  $\sim 10^{-12} \frac{\text{Торр} \cdot \text{л}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ .

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ELEMENTS OF VACUUM SYSTEM OF A SOURCE COMPTON OF SCALES-QUANTUMS ON THE BASIS OF THE STORE NESTOR

*V.G. Grevtsev, A.Yu. Zelinsky, I.I. Karnaukhov, V.P. Kozin, N.I. Mocheshnikov*

The conditions of reception of pressure  $\sim 10^{-10}$  Torr in the chamber reconstruction of the storage-ring NESTOR are considered at use both local and distributed means spooling. The allowable importance gassing as for the account thermal desorption and desorption for the account synchrotron radiation are determined and the variant of arrangement of means spooling on perimeter of the store NESTOR is chosen. The installation for research of various physical-chemical ways of reception of pure vacuum

surfaces with specific gassing less  $q \sim 10^{-11} \frac{\text{Torr} \cdot \text{l}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$  is created high vacuum. In installation the vacuum  $\sim 4 \cdot 10^{-10}$  Torr and specific gassing  $\sim 10^{-12} \frac{\text{Torr} \cdot \text{l}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$  are obtained.