



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2016–2

А.И. Капичников, А.М. Кивер, А.В. Ларионов, А.А. Матюшин,  
К.Г. Мирзоев, А.Н. Пылаев, А.Д. Рябов

**Вакуумная система протонного радиографического  
комплекса**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2016

**Аннотация**

Капичников А.И. и др. Вакуумная система протонного радиографического комплекса: Препринт ИФВЭ 2016–2. – Протвино, 2016. – 12 с., 3 рис., 2 табл., библиогр.: 6.

Разработана и введена в эксплуатацию вакуумная система протонного радиографического комплекса. В ионопроводе радиографического комплекса получен высокий вакуум  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Реализовано управление вакуумным оборудованием в местном (из тоннеля), дистанционном (из здания) режимах и от ЭВМ.

**Abstract**

Kapichnikov A.I. et al. The vacuum system of the Proton radiographic Facility: IHEP Preprint 2016–. – Protvino, 2016. – p. 12, figs. 3, tables 2, refs.: 6.

The vacuum system of the Proton radiographic Facility was developed and commissioned. The high vacuum  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  Torr is obtained in the ion chamber. The control of the vacuum equipments was implemented in local (from tunnel) or remote (from building) modes and from the computer.

## **Введение**

В ГНЦ ИФВЭ НИЦ “Курчатовский институт” в 2015 году введен в эксплуатацию протонный радиографический комплекс (ПРГК). Данный комплекс состоит из канала транспортировки протонного пучка и протонной радиографической установки (ПРГУ), позволяющей наблюдать тест-объекты оптической толщины до  $450 \text{ г/см}^2$  с полем обзора не менее 200 мм при энергии протонов  $50 \div 70 \text{ ГэВ}$  [1]. Канал транспортировки протонов от ускорителя У-70 до ПРГУ является частью канала инъекции УНК, который был адаптирован для перевода протонного пучка в радиографическую установку.

В данной работе рассмотрена вакуумная система протонного радиографического комплекса, состоящая из вакуумных систем канала транспортировки протонного пучка и протонной радиографической установки. Приведен расчет параметров вакуумной системы ПРГУ и расчет вакуумных камер ПРГУ на устойчивость и прочность.

## **Расчет параметров вакуумной системы протонной радиографической установки**

Так как вакуумная система установки является продолжением высоковакуумного канала инъекции УНК (канала транспортировки), то целесообразно откачивать ПРГУ, как и прежний канал инъекции УНК, магниторазрядными насосами типа НВИГ-100 до давления  $\leq 5 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$  Такое давление выбрано в целях устойчивого режима работы насосов. Кроме того, откачка всего комплекса магниторазрядными насосами позволит повысить надежность работы вакуумной системы.

В соответствии с параметрами протонного пучка вакуумный цилиндрический ионопровод ПРГУ должен иметь апертуру  $\varnothing 350$  мм, а вакуумные камеры, устанавливаемые в квадрупольные линзы, должны быть эллиптического сечения с апертурой  $360 \times 230$  мм. Ионопровод ПРГУ разделен атмосферными промежутками на 5 участков.

В табл. 1 представлены результаты расчета вакуумных параметров и геометрические данные участков ПРГУ.

Таблица 1. Результаты расчета вакуумных параметров ПРГУ.

№	Участок	1	2	3	4	5
	Параметр					
1	Апертура камеры, мм	350	350	350	350	350
2	Длина участка, м	65,35	63,70	63,70	63,70	14,40
3	Внутр. поверхность, см <sup>2</sup>	$7,3 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
4	Объем участка, м <sup>3</sup>	6,66	6,1	6,1	6,1	1,4
5	Количество постов предварительной откачки (ППО), штук	1	1	1	1	1
6	Количество магниторазрядных насосов (НМ), штук	5	5	5	5	2
7	Среднее расстояние между двумя НМ, м	13,03	12,74	12,74	12,74	14,4
8	Давление $P_H$ у насосов НМ, мм рт. ст. (Тор)	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$

При расчете вакуумных параметров учитывались следующие компоненты остаточного газа: водород (массовое число 2) и азот с окисью углерода (масса 28). Расчет проводился по формуле:

$$P_H = \frac{Q_T + qBl}{S}, \quad (1)$$

где  $P_H$  – давление в камере у патрубка магниторазрядного насоса,  $l$  – расстояние между двумя соседними насосами,  $Q_T$  – сосредоточенный поток через неконтролируемые течи,  $q$  – поток газовой выделению с единицы поверхности камеры,  $B$  – периметр камеры,  $S$  – быстрота действия насоса. Давление определялось как сумма парциальных давлений компонентов. При расчете взяты следующие исходные данные: для массового числа 28  $q = 10^{-10}$  л·Тор/(с·см<sup>2</sup>),  $Q_T = 5 \cdot 10^{-5}$  л·Тор/с; для массового числа 2  $q = 1 \cdot 10^{-9}$

л·Тор/(с·см<sup>2</sup>) и  $Q_T = 0$ . Быстрота действия насосов для обоих компонентов принята равной 100 л/с. При таких условиях приемлемое давление у насосов  $(2\div 3) \cdot 10^{-6}$  Тор может быть получено при среднем расстоянии между ними 12÷15 м. Максимальное давление в середине между насосами ненамного превышает давление в насосах из-за большой проводимости камеры. После откачки в течение нескольких дней поток газовой выделения должен снизиться в несколько раз, что приведет к улучшению режима работы насосов.

Среднее давление, достигаемое при предварительной откачке постом, расположенным примерно в середине участка длиной  $2l_1$ , определяется по следующей формуле:

$$\overline{P}_{\text{пост}} = \frac{2(Q_T + qBl_1)}{S_{\text{он}}} + \frac{Q_T l_1}{4u_0} + \frac{qBl_1^2}{3u_0}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{он}}$  – эффективная быстрота действия поста на входе в камеру, а  $u_0$  – удельная проводимость камеры по данному компоненту остаточного газа. Приняв  $S_{\text{он}} = 100$  л/с и  $l_1 \leq 33$  м, получим суммарное среднее давление по водороду и азоту,  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Тор для всех участков апертуры  $\varnothing 350$  мм, что вполне приемлемо.

## Расчет вакуумных камер ПРГУ на устойчивость и прочность

Толщина стенки  $t$  вакуумных цилиндрических камер определяется исходя из условия устойчивости по формуле [2]:

$$t = 1,25D \left( \frac{P_H}{E} \frac{l}{D} \right)^{0,4} + c, \quad (3)$$

справедливой при  $1 \leq \frac{l}{D} \leq 8$  и  $\left( \frac{P_H}{E} \frac{l}{D} \right)^{0,4} \leq 0,523$ .

В этой формуле:  $E$  – модуль упругости материала трубы;  $l$  – длина,  $D$  – внутренний диаметр трубы;  $P_H$  – внешнее давление;  $c$  – допускаемое отклонение по толщине стенки.

Для трубы диаметра  $D = 350$  мм и длиной  $l = 2$  м, выполненной из стали ( $E = 200$  ГПа), при внешнем давлении  $P_H = 0,1$  МПа и  $c = 0,22$  мм формула (3) дает оценку

для толщины стенки  $t = (2,67 + 0,22)$  мм. При этом условия справедливости формулы выполняются:  $\frac{l}{D} = 5,7; \left(\frac{P_H l}{E D}\right)^{0,4} = 6,1 \cdot 10^{-3}$ .

Принимаем толщину стенки цилиндрической камеры равной  $t = 3$  мм. Проблемы прочности камеры нет, поскольку максимальные напряжения в стенке камеры малы:  $\sigma_{max} = P_H(D/2t) \approx 6$  МПа. Исходя из расчета на устойчивость и удобства монтажа максимальная длина камер выбрана равной 3 м с армирующим кольцом посередине. Вес такой камеры составляет  $\sim 90$  кг. Камеры длиной до 2-х метров не требуют усиления.

Для эллиптической вакуумной камеры были проведены расчеты на устойчивость и прочность с использованием системы численного моделирования ANSYS. Рассматривалась гладкая камера, усиленная массивными фланцами. В расчетах длина камеры принималась равной 2,3 метра, полуоси внутреннего эллипса составляли  $a = 180$  мм и  $b = 116,5$  мм, толщина стенки камеры варьировалась от 3 до 6 мм с шагом 0,5 мм. Диаметр фланца был равен 400 мм, его толщина – 17 мм. Камера свободно лежит внутри апертуры магнита, опираясь в трех сечениях на подставки, установленные на нижних гиперболических полюсах магнита. Фактически камера опирается на 6 точек (по 2 в каждом сечении), которые и держат вес камеры. В расчетах разрешено скольжение камеры по точкам опоры.

Решается нелинейная задача упругости в больших перемещениях. Нагрузка (внешнее давление) возрастает постепенно от нуля до максимального значения, принятого в расчетах равным  $P_{max} = 3$  атм. При этом направление действия сил давления следует изменяющейся геометрии, т.е. давление всегда действует по нормали в каждой точке оболочки.

В процессе решения не осуществляются проверки на разрушение материала, а также не учитываются пластические деформации, поскольку в приемлемом варианте материал камеры должен работать в упругой области, а камера должна обладать достаточным запасом прочности. Таким образом, приведенные результаты относятся к гипотетической стали, предел упругости которой достаточно большой.

Расчеты показали, что для камер с толщиной стенки не менее 3,5 мм проблемы устойчивости не существует вплоть до  $P_{max} = 3$  атм. На первый план выходит проблема прочности. Камеры с достаточно толстыми стенками при увеличении давления вплоть до 3 атм ведут себя одинаковым образом: происходит сплющивание камеры вдоль малой оси эллипса с одновременным увеличением размеров вдоль большой оси. При этом оболочка остается поверхностью положительной кривизны (эллипсоподобное сечение) и хорошо держит нагрузку (наблюдается почти линейная зависимость деформаций и напряжений от нагрузки) за счет упругости материала. Максимальные напряжения развиваются в зоне наименьшей кривизны на внутренних поверхностях оболочки.

В табл. 2 представлены основные результаты расчета для всех толщин камеры при номинальном давлении 1 атм.

Таблица 2. Максимальные напряжения, перемещения и “запас упругости” в эллиптических камерах при номинальном давлении  $P = 1$  атм.

Толщина $t$ , мм	Вес <sup>*)</sup> , кг	$\sigma_{eqv}^{max}$ , МПа	$U_{max}$ , мм	$U_{max}/t$	$\frac{\sigma_{02}}{\sigma_{eqv}^{max}}$	Комментарии
3.0	52.2	391	13.3	4.4	0.5	Пластические деформации, $U_{max} > t$
3.5	60.9	240	8.0	2.3	0.8	Пластические деформации, $U_{max} > t$
4.0	69.8	209	5.3	1.3	1.0	На границе пластической области, $U_{max} > t$
4.5	78.6	142	3.8	0.84	1.6	Упругие деформации, $0,5t < U_{max} < t$
5.0	87.4	135	2.7	0.55	1.7	Упругие деформации, $0,5t < U_{max} < t$
5.5	96.3	112	2.1	0.37	2.1	Упругие деформации, $U_{max} < 0,5t$
6.0	105.2	94	1.6	0.27	2.5	Упругие деформации, $U_{max} < 0,5t$

\*) Без фланцев.

В таблице:  $\sigma_{eqv}$  – эквивалентное напряжение, определяемое формулой:

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \quad , \quad (4)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  – главные значения тензора напряжений;  $U_{max}$  – максимальное перемещение; “запас упругости” – определяется как отношение предела пропорциональности материала  $\sigma_{02}$  к величине максимального эквивалентного напряжения. Для оценок предел пропорциональности выбран равным типичному значению для тонколистовых сталей  $\sigma_{02} = 205$  МПа.

Из таблицы видно, что толщина стенки камеры должна быть не менее 4,5 мм, чтобы камера при номинальной нагрузке работала в упругой области.

В работе [3] представлены уравнения для вычисления моментов сил и напряжений в стенке эллиптической камеры под действием внутреннего или внешнего давления. Уравнения выводятся в приближении линейной теории упругости, а значит справедливы для камер с достаточно большой толщиной стенки. Максимальное напряжение можно оценить по формуле:

$$\sigma_{2max} = P \left( 6K_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + \frac{a}{t} \right), \quad (5)$$

в которой коэффициент  $K_2$  зависит от отношения полуосей эллипса  $b/a$ . В нашем случае  $K_2 = 0,16$  (см. график 5 в [3]), и для камеры толщиной  $t = 5$  мм получается оценка  $\sigma_{2max} = 130$  МПа, что близко к значению 135 МПа, представленному в табл. 2.

Исходя из того, что для эллиптических камер отсутствует проблема устойчивости, а внешняя нагрузка (атмосферное давление) не может быть произвольно увеличена более чем на 10 %, считаем запас упругости на уровне 1,7 приемлемым, и выбираем толщину стенки камеры равной 5 мм.

## Описание вакуумной системы ПРГК

В качестве канала транспортировки протонного пучка от ускорителя У-70 до ПРГУ используется участок высоковакуумного канала инжекции УНК длиной около 500 м. Для согласования магнитооптической структуры канала инжекции и ПРГУ изменена только расстановка линз в конце канала. Участок канала транспортировки протонов с постом предварительной откачки показан на рис. 1.





Рис. 1. Участок канала транспортировки протонов с постом предварительной откачки.

Ионопровод канала транспортировки собран из вакуумных камер с апертурой  $\varnothing 97$  мм, соединенных между собой с помощью быстроразъемных соединений с медными прокладками. Вакуумные камеры из нержавеющей стали 09X18H10T изготовлены из трубы  $\varnothing 100 \times 1,5$  мм. Ионопровод разделен на 6 участков шиберными цельнометаллическими затворами ЗПА-100 [4].

По результатам расчетов спроектирована вакуумная система ПРГУ, спроектированы и изготовлены цилиндрические камеры из нержавеющей стали 304L с апертурой  $\varnothing 350$  мм и эллиптические камеры из нержавеющей стали со слабыми магнитными свойствами 05X20H15AG6 с апертурой  $360 \times 230$  мм. Цилиндрические камеры изготовлены из трубы  $\varnothing 356 \times 3$  мм, а эллиптические камеры изготовлены из отформованных листов толщиной 5 мм с продольными сварными швами по большой оси эллипса. Проведены измерения величины упругой деформации эллиптической вакуумной камеры под действием атмосферного давления при откачке. Прогиб стенки камеры по малой оси эллипса в центре по длине составил 2,3 мм, что на 15 % меньше величины, полученной по предварительным расчетам.

Фланцы камер выполнены по стандарту ISO-K и соединяются друг с другом с помощью специальных струбцин на прокладках из вакуумной резины круглого сечения диаметром 7 мм.

Ионопровод ПРГУ разделен на 5 участков с помощью мембранных заглушек из нержавеющей стали толщиной 0,25 мм. На каждом участке канала транспортировки и ПРГУ установлен пост предварительной откачки ППО-300/5 [5], который откачивает участок до оптимального давления для запуска магниторазрядных насосов НВИГ-100, не выше  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Тор. Посты и магниторазрядные насосы подсоединяются к камерам канала транспортировки и ПРГУ через патрубки с апертурой  $\varnothing 97$  мм с использованием медных проволочных уплотнений. Всего на канале транспортировки установлено 6 ППО и 16 магниторазрядных насосов, а на ПРГУ установлено 5 ППО и 22 магниторазрядных насоса. ППО состоит из турбомолекулярного насоса 01АБ-450-003, ловушки для улавливания паров масла, механического насоса 2НВР-5ДМ и запорной арматуры. Электропневматические приводы запорной арматуры постов работают при давлениях сжатого воздуха 5 и 20 атм. Пост подсоединяется к вакуумной камере через затвор ЗПА-100. Участок вакуумной системы ПРГУ с ППО показан на рис. 2.



Рис. 2. Участок вакуумной системы ПРГУ с постом предварительной откачки.

Измерение вакуума в канале транспортировки и в ПРГУ осуществляется с помощью устройства контроля и индикации вакуума УКВ-3/7-003, в состав которого входят: блок питания датчиков вакуума БПДВ-8-001, датчик вакуума терморезистивный ДВТ-3/0-006, датчик вакуума электроразрядный ДВЭ-0/7-007. Датчики ДВТ и ДВЭ работают соответственно с манометрическими преобразователями ПМТ6-3 и ПММ-32. Для сбора сигналов с датчиков вакуума используется специализированный контроллер КДВ-8, имеющий 8 аналоговых входов. Контроллер подключается к блоку питания датчиков вакуума БПДВ-8-001, из которого он получает аналоговые сигналы в диапазоне от 0 до 10 В. Конструкция блока обеспечивает одновременное подключение шести датчиков: 4 датчиков ДВТ и 2 датчиков ДВЭ. Контроллер измеряет напряжение с 6 датчиков с периодом 1 секунда. Полученный 16-разрядный код с каждого датчика передаётся на верхний уровень, где после преобразования в давление отображается на операторской консоли. В вакуумных системах ПРГК используются 6 контроллеров КДВ-8, к которым можно подключить сигналы с 48 вакуумных датчиков.

Посты предварительной откачки канала транспортировки и ПРГУ управляются непосредственно от электрических шкафов в тоннеле и от стоек управления, расположенных в зданиях. Магниторазрядные насосы питаются и управляются от стоек, расположенных только в зданиях. В каждой стойке управления магниторазрядными насосами размещены три высоковольтных источника питания и блок сопряжения с объектом (БСО), являющийся интерфейсом между вакуумным оборудованием и системой управления протонного радиографического комплекса (СУ ПРГК) [6]. Контроллер ВК-1, входящий в состав БСО, обеспечивает обмен информацией с верхним уровнем в соответствии с принятым в СУ ПРГК протоколом. Контроллеры ВК-1, объединённые по стандарту CAN в локальную сеть, каждые 2 секунды передают на верхний уровень системы управления основные статусы и измеренные значения токов насосов. Измерительная часть стойки включает три 24-разрядных АЦП, обеспечивающих измерение токов насосов в диапазоне  $300 \text{ мА} \div 10 \text{ мкА}$ . Измеренные значения токов усредняются, нормируются и выводятся в каждой стойке на местную индикацию для оперативного контроля.

На верхнем уровне информация о работе вакуумного оборудования отображается на операторской консоли в виде синоптики расположения элементов вакуумной систе-

мы с измеренными величинами давлений и токов насосов. Ниже синоптики располагаются часть интерфейса, на которую можно вывести в виде графика профиль распределения токов магниторазрядных насосов или давления вдоль канала, а также можно вывести архивные данные. Реализована также возможность включения и отключения магниторазрядных насосов из меню, появляющегося при выборе насоса на синоптике. После запуска магниторазрядных насосов и перехода их в рабочий режим оператор может включить программу автоматического слежения за работой насосов. В случае кратковременного пробоя внутри насоса встроенная защита отключает блок питания. В такой ситуации программа автоматического слежения сделает три попытки повторного включения с интервалом 10, 30 секунд и 1 минута. Если насос не включится, то индицируется аварийное состояние насоса, требующее вмешательство дежурного персонала. На рис. 3 показан интерфейс программы управления вакуумным оборудованием ПРГК [6].

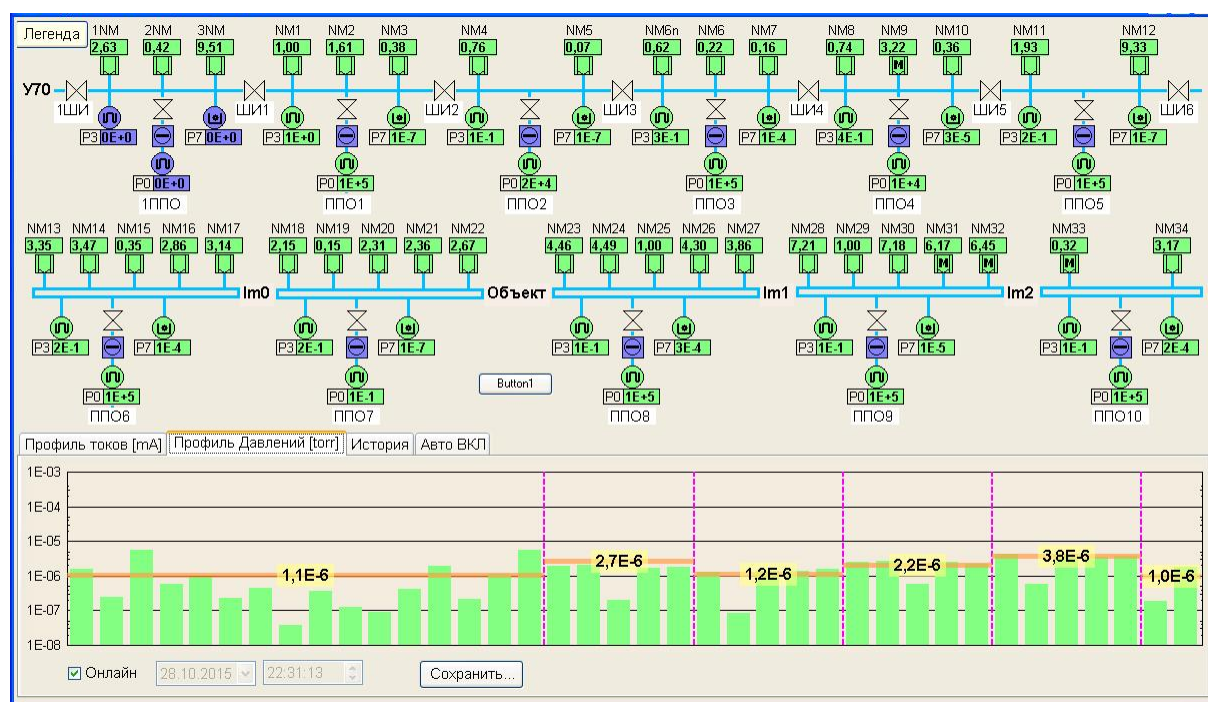


Рис. 3. Интерфейс программы управления вакуумным оборудованием ПРГК.

Вся информация о работе вакуумного оборудования: токи насосов, величины давлений, статусные сигналы, статистика включений и отключений – заносится в архив.

В ионопроводе канала транспортировки и в вакуумных камерах ПРГУ в сеансе работы с протонным пучком получено среднее давление  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  Тор. Распределение давления по каналу транспортировки и ПРГУ показано на графике в нижней части рис. 3. Непрерывный программный надзор за состоянием оборудования обеспечивает максимальное число включённых насосов, что позволяет поддерживать высокий вакуум в течение всего эксперимента.

### **Заключение**

Разработана и создана вакуумная система протонной радиографической установки на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», которая показала свою работоспособность. Рассчитаны параметры вакуумной системы установки, а также выполнены расчеты на устойчивость и прочность цилиндрических вакуумных камер ионопровода и эллиптических камер квадрупольных линз.

С помощью постов предварительной откачки в ионопроводе получается вакуум  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  Тор, требуемый для запуска в работу магниторазрядных насосов. Дальнейшая откачка производится только магниторазрядными насосами, с помощью которых в ионопроводе канала транспортировки протонов и в камерах протонной радиографической установки получен вакуум  $\sim 2 \cdot 10^{-6}$  Тор.

Реализованы дистанционное управление постами предварительной откачки и магниторазрядными насосами, а также сбор информации о работе вакуумного оборудования (токи насосов, величины давлений, статусные сигналы, статистика включений/отключений) с занесением в архив. Анализ архивных данных позволяет целенаправленно проводить профилактическое обслуживание вакуумного оборудования.

Компьютерное управление вакуумной системой ПРГК позволило эффективно решить проблему обслуживания территориально разбросанного оборудования, что значительно снизило нагрузку на оперативный персонал.

## Список литературы

- [1] Андриянов А.И., Афонин А.Г., Гусев И.Г., Зятьков О.В. и др. Ввод в эксплуатацию комплекса ПРГК на ускорителе У-70 ГНЦ ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 2015-3, Протвино, 2015.
- [2] Данилин Б.С., Минайчев В.Е. Основы конструирования вакуумных систем. Под общей редакцией Р.А. Нилендера. М., «Энергия», 1971.
- [3] R.T. Avery and G.A. Tidrick. Elliptical Vacuum Chamber Stress and Deflections. In IEEE 1969, p. 952.
- [4] Губриенко К.И. и др. Прямопролетные цельнометаллические затворы для вакуумной системы УНК. Препринт ИФВЭ 87-96, 1987.
- [5] Антонов С.С., Губриенко К.И., Кивер А.М. и др. Вакуумная система периода регулярной магнитной структуры I ступени УНК. Препринт ИФВЭ 91-102, 1991, с. 3-4.
- [6] Атрощенко С.А., Копылов Л.И., Матюшин А.А., Меркер С.Э., Михеев М.С. Система управления Протонографическим комплексом У-70. Препринт ИФВЭ 2014 – 9, Протвино, 2014. – 12 с.

*Рукопись поступила 22 января 2016 г.*

А.И. Капичников и др.

Вакуумная система протонного радиографического комплекса.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

---

Подписано к печати 28.01.2016.                      Формат 60 × 84/16.                      Цифровая печать.

Печ.л. 1.                      Уч.– изд.л. 1,34.                      Тираж 80.                      Заказ 3.                      Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2016-2,  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2016

---