

сообщения  
Объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

3201/2-80

14/2-80

P8-80-172

Н.И.Баландиков, А.Г.Зельдович, Л.П.Зиновьев,  
А.И.Пикин

СИСТЕМА КРИОГЕННОЙ ОТКАЧКИ  
ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ  
СИНХРОФАЗОТРОНА ЛВЭ ОИЯИ

1980

## 1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАССУ УСКОРЯЕМЫХ В СИНХРОФАЗОТРОНЕ ЯДЕР

Известно, что при ускорении ядер тяжелых элементов основным каналом потерь является их выход из резонансных условий ускорения вследствие подхвата электронов на атомную оболочку ядра при столкновениях с молекулами остаточного газа. Величина потерь ядер, в частности для синхротрона, определяется вакуумом в камере основного кольца, энергией инжекции и темпом набора энергии в кольце. Для синхрофазотрона ЛВЭ в режиме ускорения ядер с  $\frac{Z}{M} = \frac{1}{2}$  соответствующие параметры составляют:

$P_{\text{кам.}} = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Тор,  $E_{\text{инж.}} = 5$  МэВ/нуклон,  $E = 1,25$  кэВ/нукл.об.  
В этих условиях расчетная величина коэффициента ослабления интенсивности, определяемого как отношение конечной интенсивности пучка к начальной<sup>1/1</sup>, равна:

$$K = \frac{N}{N_0} = e^{-\alpha P},$$

$$\alpha = n_0 \int_0^L \sigma(x) dx, \quad //$$

где  $n_0 = 7,1 \cdot 10^{10}$  атом/см<sup>3</sup>,  $P$  - среднее давление в камере в единицах  $10^{-6}$  Тор,  $\sigma$  - сечение перезарядки ускоряемого иона, см<sup>2</sup>.

При ускорении ядер неона  $Z=10$ , когда  $P_{\text{кам.}} = 2 \cdot 10^{-6}$  Тор, коэффициент ослабления интенсивности составляет<sup>1/2</sup>

$$K = 3 \cdot 10^{-4}.$$

Такой уровень потерь является недопустимым, и последним элементом, который при существующих условиях может быть ускорен на синхрофазотроне ЛВЭ, является кислород  $Z=8$ /<sup>1/3</sup>.

## 2. ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЯДЕР

В настоящее время опубликовано два предложения по снижению потерь ядер при ускорении на синхрофазотроне: увеличение темпа набора энергии ядрами на начальном этапе ускорения в кольце при форсировке магнитного поля<sup>1/4</sup> и увеличение энергии инжек-



ции, достигаемое установкой линейного ускорителя на базе резонатора ЛУ-9М за ускорителем ЛУ-20<sup>12/</sup>.

Первое предложение позволяет снизить потери ядер за счет уменьшения эффективной толщины мишени, состоящей из остаточного газа, в интервале энергий, где сечение подхвата электронов ядрами велико. Суть эффекта второго предложения состоит в том, что в камеру инжектируются ядра с энергией 10 МэВ/нуклон, сечение подхвата электронов которыми меньше, чем у ядер с энергией 5 МэВ/нуклон.

Из выражения /1/ для К следует, что весьма эффективным методом уменьшения потерь ядер является снижение давления остаточного газа в вакуумной камере ускорителя. В настоящей работе рассматривается система криогенной откачки, которая позволит снизить давление остаточного газа до величины  $P_{\text{кам.}} = 2 \cdot 10^{-7}$  Тор. В частности, как показывают проведенные оценки, при ускорении на синхрофазотроне ядер неона эффект улучшения вакуума с  $P_{\text{кам.}} = 2 \cdot 10^{-6}$  Тор до  $P_{\text{кам.}} = 2 \cdot 10^{-7}$  Тор будет заключаться в снижении потерь ядерного пучка с  $K = 3 \cdot 10^{-4}$  до  $K = 0,44$ . Указанное улучшение вакуума сделает возможным ускорение на синхрофазотроне ядер вплоть до аргона /  $Z=18$ / даже при неизменных энергии инжекции и темпе роста магнитного поля.

Такой метод снижения потерь был успешно реализован на бэватроне / LBL, США/ в 1972 году<sup>15/</sup>.

### 3. ПАРАМЕТРЫ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ СИНХРОФАЗОТРОНА

Вакуумная система синхрофазотрона после откачки в течение месяца имеет следующие основные параметры:

- предельный вакуум:  $P_{\text{кам.}} = 2,5 \cdot 10^{-6}$  Тор,
- среднее натекание газов:  $Q = 0,15$  Тор.л/с,
- суммарная скорость откачки всех вакуумных агрегатов:  $S = 6,5 \cdot 10^4$  л/с.

В остаточном газе вакуумной камеры синхрофазотрона азот составляет 75%, остальные компоненты - вода, углеводороды, кислород и очень незначительные количества водорода, гелия, неона.

### 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОЙ ОТКАЧКИ

Такой состав остаточного газа позволяет использовать для существенного улучшения вакуума эффект конденсации молекул остаточного газа на поверхностях криопанелей с температурой ~20 К, соответствующей точке кипения жидкого водорода. Эта

температура криопанели обеспечивает величину коэффициента прилипания молекул азота при конденсации  $C_k = 0,84^{16/}$ . Для остальных газов, кроме водорода, гелия и неона,  $C_k = 1$ .

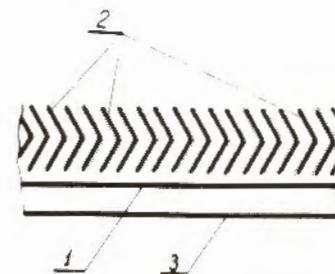
Требуемое давление  $P_{\text{кам.}} = 2 \cdot 10^{-7}$  Тор можно получить, если обеспечить скорость откачки азота

$$S_{N_2} = \frac{0,15 \text{ Тор.л/с} \cdot 0,75}{2 \cdot 10^{-7} \text{ Тор}} = 5,6 \cdot 10^5 \text{ л/с.}$$

Из молекулярно-кинетической теории следует, что если коэффициент прилипания молекулы на поверхность криопанели  $C_k = 1$ , ее удельная скорость откачки по азоту составляет  $s_{\text{уд.}} = 11,6$  л/с·см<sup>2</sup> при комнатной температуре газа. Но поскольку из энергетических соображений криопанель должна быть экранирована от теплового излучения поверхностями с температурой жидкого азота / ~78 К/, удельная скорость откачки будет меньше.

Оптимизация формы радиационного экрана должна производиться по скорости откачки и теплопритокам к криопанели и экрану с учетом реального размещения системы криогенной откачки в вакуумной камере синхрофазотрона. Такой анализ показывает, что в данном случае наиболее подходящим экраном является оптически плотная система параллельных шевронов с углом раствора 120° и коэффициентом заполнения экрана шевронами, равным 1 /рис.1/.

Рис.1. Схема экранирования криопанели. 1 - криопанель /20 К/, 2 - шевронный экран / 78 К/, 3 - сплошной экран / 78 К/.



Так как вероятность пролета молекулы через экран такой конфигурации  $C_k = 0,36^{16/}$ , удельная скорость откачки системы экран-криопанель составит

$$s_{\text{уд.}} = 4,18 \text{ л/с.см}^2.$$

Таким образом, площадь поверхности криопанели, которая обеспечивает требуемую величину скорости откачки азота, будет равна:

$$F_{\text{пан.}} = 13,4 \text{ м}^2.$$

Очевидно, что для эффективного экранирования криопанели от теплового излучения шевроны необходимо чернить, добиваясь коэффициента черноты  $\epsilon$ , близкого к 1. Сплошной же экран, непрозрачный для молекул, должен иметь минимально возможный коэффициент черноты. Эффективность экрана  $E_{\text{экр.}}$ , определяемая как отношение удельной скорости откачки  $s_{\text{уд.}}$  к удельному теплоритому излучением на экран  $q_{\text{уд.}}$ , при коэффициенте черноты  $\epsilon = 0,9$  составит:

$$E_{\text{экр.}} = \frac{s_{\text{уд.}}}{q_{\text{уд.}}} = 100 \text{ л/с} \cdot \text{Вт}.$$

Так как радиационный экран за счет конденсации молекул будет с высокой скоростью откачивать воду, двуокись углерода и углеводороды, при общем снижении давления доля этих компонентов в спектре остаточного газа уменьшится.

Для откачки неконденсирующихся компонентов остаточного газа /водорода, гелия и неона/ необходимы дополнительные насосы - диффузионные или магниторазрядные. Вследствие того, что парциальные давления этих газов очень малы, скорость откачки дополнительных насосов требуется небольшая  $1/S_{\text{доп.}} \sim 1/2 \div 5 \cdot 10^3 \text{ л/с/}$ .

#### 4. ОБЩАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ КРИОГЕННОЙ ОТКАЧКИ

Так как натекание в вакуумную камеру синхрофазотрона распределено равномерно, секции криогенной откачки с общей площадью криопанелей  $13,4 \text{ м}^2$  целесообразно разместить в камере также равномерно. Чтобы не вносить изменений в существующую систему диагностики ионного пучка и не уменьшать скорости откачки вакуумных насосов, секции можно разместить на внутреннем периметре камеры в промежутках между окнами /рис.2/. Искажение магнитного поля от индуцированного в элементах системы кольцевого тока можно исключить, если всю систему выполнить в виде разомкнутого кольца, а секции и переходные трубопроводы изолировать от корпуса камеры.

Поперечное сечение секции криогенной откачки представлено на рис.3. Криопанель /1/, охлаждаемая жидким водородом или холодным гелием, циркулирующим по трубам /2/, заключена внутри радиационного экрана /3/ с температурой 78 К. Экран охлаждается жидким азотом, циркулирующим по трубам /4/. Откачка камеры ведется через оптически плотную систему шевронов /5/. Слой суперизоляции /6/ снижает теплоприток излучением к жидкому азоту.

Рис.2. Схема размещения секций криогенной откачки в вакуумной камере синхрофазотрона. 1 - ярмо магнита синхрофазотрона, 2 - вакуумная камера, 3 - секции криогенной откачки, 4 - переходные трубопроводы.

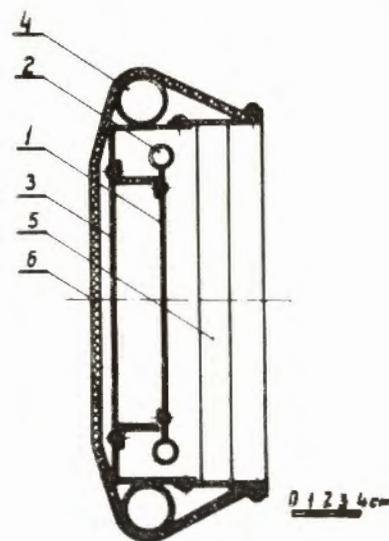
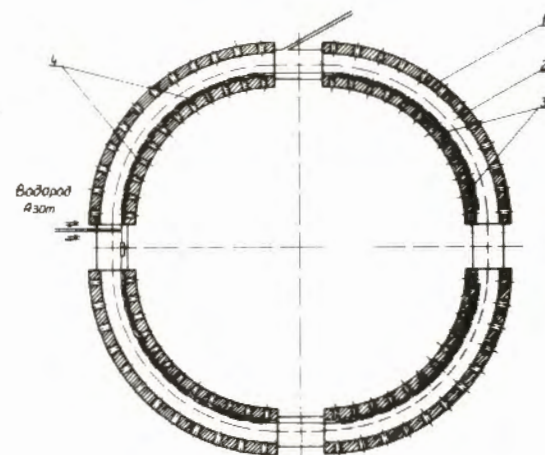


Рис.3. Поперечное сечение секции криогенной откачки. 1 - криопанель, 2 - трубопровод для жидкого водорода или холодного газообразного гелия, 3 - корпус радиационного экрана, 4 - трубопровод для жидкого азота, 5 - шеврон, 6 - суперизоляция.

#### 5. ПОТРЕБЛЕНИЕ ХЛАДАГЕНТОВ

##### 5.1. Температурный уровень 20 К

Основным каналом теплопритока к криопанелям является тепловое излучение. Решающее значение для расчета мощности теплового излучения имеет коэффициент черноты  $\epsilon$  холодной поверхности. Если исходить из предельной величины  $\epsilon$  для незачерненной поверхности  $\epsilon = 0,8$ , которая реализуется после длительной эксплуатации в условиях наличия паров масла, пыли и влаги, получим мощность излучения на криопанель:

$$Q_{\text{излуч. пан.}} = 70 \text{ Вт}.$$



Теплоприток за счет тепловых мостов и переноса тепла остаточным газом значительно меньше этой величины. Общая величина теплопритока к элементам системы, имеющим температуру 20 К, оценивается величиной

$$Q_{20K} = 100 \text{ Вт}.$$

Если в качестве хладагента использовать жидкий водород, такой мощности соответствует потребление 16 литров жидкого водорода в час.

## 5.2. Температурный уровень 78 К

Для термостатирования азотных радиационных экранов целесообразно использовать только теплоту испарения жидкого азота. Так как эффективное экранирование криопанели шевронами предполагает высокий коэффициент черноты шевронов  $\epsilon \approx 0,9$ , основной поток излучения будет восприниматься шевронами. Теплоприток к жидкому азоту, по оценкам, составит:

$$Q_{78} = 7,5 \text{ кВт},$$

что соответствует потреблению  $\sim 4 \text{ м}^3$  жидкого азота в сутки.

## 6. РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КРИОГЕННОЙ ОТКАЧКИ

Охлаждение системы криогенной откачки можно начинать после предварительной откачки вакуумной камеры до давления  $P_{\text{кам.}} = \approx 1-2 \cdot 10^{-5}$  Тор с помощью существующих вакуумных агрегатов. Предварительная откачка необходима для уменьшения десорбции за счет переконденсации.

Время ввода системы криогенной откачки в рабочий режим с начала охлаждения оценивается в  $/8 \div 10/$  часов. Поддержание необходимой температуры рабочих поверхностей в стационарном режиме должно производиться с помощью устройств автоматики.

Форсированное отепление системы продувкой нагретых газов через трубы криопанелей и экранов позволит нагреть все элементы системы криогенной откачки до комнатной температуры за несколько часов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Улучшение вакуума в камере синхрофазотрона есть прямой путь снижения потерь ядер при ускорении. Единственной реальной возможностью десятикратного улучшения вакуума в синхрофазотроне

является криогенная откачка. Рассмотренная система криогенной откачки помимо решения основной задачи - получения высокого вакуума - позволяет значительно повысить мобильность вакуумной системы.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность И.Н.Семенюшкину за поддержку работы, Ю.К.Пилипенко за полезные замечания и С.С.Нагдасеву за предоставление данных о вакуумной системе синхрофазотрона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.А. и др. Труды РТИ АН СССР, 1975, вып.22, с.200.
2. Безногих Ю.Д. и др. ОИЯИ, 9-11714, Дубна, 1978.
3. Вадеев В.П. и др. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна, 1977.
4. Донец Е.Д. и др. ОИЯИ, 9-7043, Дубна, 1973.
5. Burns R.A., Tapabe J.T. IEEE Trans. on Nucl.Sci., NS-20, No.3, 1973, p.91.
6. Минайчев В.Е. Вакуумные крионасосы. "Энергия", М., 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 февраля 1980 года.