

УДК 621.384.634.5

## **ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ В КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЕ НУКЛОТРОНА — СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО УСКОРИТЕЛЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР**

*Н. Н. Агапов, В. И. Батин, Ю. А. Васенева*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Предложена и реализована модернизация схемы криостатирования нуклотрона с применением струйных аппаратов, что позволило значительно увеличить массовый расход жидкого гелия, прокачиваемого через сверхпроводящие магниты ускорителя. В результате повышена надежность и устойчивость работы сверхпроводящей магнитной системы нуклотрона, количество электроэнергии, потребляемое ускорителем, уменьшено не менее чем на 600 кВт. Проведены предварительные измерения дополнительного массового расхода жидкого гелия, полученного путем использования струйных аппаратов.

The modernization of a cryostatting scheme of the Nuclotron with the jet pumps was proposed and realized. This allowed one to increase greatly the flow rate of liquid helium pumpable via the superconducting magnets of the accelerator. As a result, the reliability and the operation stability of the superconducting magnet system of the Nuclotron were increased, power consumption in the cryogenic system of the accelerator was reduced by no less than 600 kW. Preliminary measurements of additional flow rate of liquid helium in the case of cryostatting of the Nuclotron with the use of the jet pumps were made.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Нуклотрон — первый быстроциклирующий синхротрон со сверхпроводящими магнитами, предназначенный для получения пучков многозарядных ионов и тяжелых ядер. Он был построен в ЛВЭ ОИЯИ в период 1987–1992 гг. Основные параметры нуклотрона приведены в [1].

Принципиальная схема криостатирования ускорителя представлена на рис. 1. В основу криогенной системы положены два гелиевых рефрижератора КГУ-1600/4,5. Каждый из них состоит из трех газовых турбодетандеров Т1, Т2 и Т3, ванны жидкого азота, двух- и трехпоточных теплообменников, парожидкостного турбодетандера Т4 и сборника жидкого гелия объемом около 1000 л. Сжатый гелий после компрессоров, пройдя очистку от масла и влаги, на входе в каждую установку КГУ-1600/4,5 разделяется на две части, одна из которых — турбодетандерный поток — после вентилей В1 расширяется последовательно в трех турбодетандерах с давления 2,5 до 0,13 МПа. Основной поток подается через вентиль В2, охлаждается за счет теплообмена с обратным потоком гелия до температуры 5,0–8,5 К и расширяется в парожидкостном турбодетандере с давления 2,5 до 0,13–0,17 МПа. В дальнейшем основной поток подается по теплоизолированному трубопроводу в промежуточный сепаратор 8, после охлаждения в котором направляется в

коллектор 3 прямого потока криостатной системы нуклотрона. Каждая из двух установок КГУ-1600/4,5 подключена к своему полукольцу.

Кольцо нуклотрона, периметр которого составляет 251,1 м, состоит из 96 дипольных магнитов длиной по 0,5 м, 64 квадрупольных линз по 0,45 м, 28 мультипольных корректоров по 0,31 м с тремя или четырьмя типами обмоток в каждом. Его криостатирование при температуре около 4,5 К осуществляется циркуляцией потока кипящего гелия по расположенным внутри обмоток параллельным каналам.

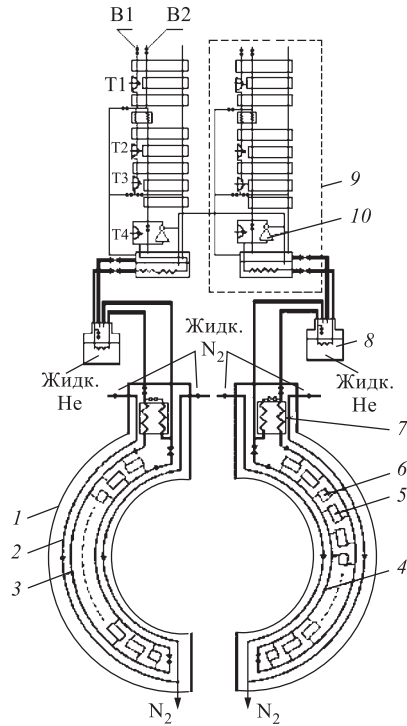


Рис. 1. Принципиальная схема криогенной гелиевой системы нуклотрона: 1 — вакуумный кожух; 2 — теплозащитный экран; 3 — коллектор прямого потока; 4 — коллектор обратного потока; 5 — дипольный магнит; 6 — квадрупольный магнит; 7 — переохладитель; 8 — сепаратор; 9 — блок охлаждения КГУ-1600/4,5; 10 — струйный насос

Имеющееся пока ограничение на скорость нарастания поля в кольце связано лишь с недостаточным рабочим напряжением источника питания контура дипольных магнитов. Однако работа нуклотрона в нерасчетном режиме сопровождается рядом проблем в ходе криостатирования кольца ускорителя. Как показано на рис. 1, каждый из дипольных и квадрупольных магнитов питается жидким гелием из коллектора, проложенного по всей длине ускорителя. В расчетном режиме из сверхпроводящего кабеля гелий выходит с массовым паросодержанием  $\sim 0,35$  и далее охлаждает железное ярмо соответствующего магнита, после чего с массовым паросодержанием до 0,9 отводится в обратный коллектор. В действительности же, ввиду работы нуклотрона с параметрами, отличающимися от проектных, и различий в конфигурациях магнитов кольца, возможно неравномерное распределение потоков по параллельным каналам. Это, в свою очередь, может приводить к полному испарению жидкости в каком-либо отдельном канале с повышением

при температуре около 4,5 К осуществляется циркуляцией потока кипящего гелия по расположенным внутри обмоток параллельным каналам.

Проектная энергия ускоряемых частиц составляет 6 ГэВ/нуклон, рабочая же достигает 4,2 ГэВ/нуклон. Получение максимальной энергии частиц пока ограничено необходимостью завершения модернизации систем обнаружения нормальной зоны и вывода энергии из сверхпроводящих магнитов ускорителя. Проектная частота цикла составляет 0,5 Гц, в настоящее время она достигает 0,2 Гц. Частота повторения рабочих циклов нуклотрона главным образом определяется возможностями его инжектора ЛУ-20 и особенно высоковольтного (до 800 кВ) импульсного трансформатора ускоряющей трубки форинжектора. Проектная скорость нарастания поля для стендовых испытаний составляет 4 Тл/с, а для кольца ускорителя 2 Тл/с. Рабочие же скорости нарастания поля достигают 4,1 и 1,0 Тл/с соответственно. Принципиальных трудностей увеличение скорости нарастания поля в ускорителе не представляет, поскольку все элементы (диполи и квадруполи) испытаны на эксплуатационный режим  $B = 2$  Тл,  $dB/dt = 4$  Тл/с,  $f = 1$  Гц.

температуры потока в нем и, следовательно, потерей сверхпроводимости в соответствующем магните. Такая ситуация часто наблюдалась в ходе эксплуатации нуклотрона в 1993–2002 гг.

В 2002 г. в схему криостатирования ускорителя были включены струйные аппараты 10. Полученный при этом дополнительный поток жидкого гелия позволил не только преодолеть указанные выше трудности, но и снизить количество одновременно работающих поршневых компрессоров, эксплуатируемых в ходе сеансов ускорителя, с 5–6 до 1–2, т. е. снизить расход энергии на величину не менее 600 кВт.

Ниже обсуждаются расчетные и экспериментальные данные, связанные с подобным применением струйных аппаратов.

## **1. ОСОБЕННОСТИ КРИОСТАТИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ**

Как известно, криостатирование сверхпроводящих магнитных систем может осуществляться как погружением обмоток магнитов в кипящий гелий — погружной способ, так и циркуляцией жидкости по расположенным внутри или около обмоток параллельным каналам — циркуляционный способ. При криостатировании протяженных магнитных систем циркуляционный способ имеет ряд преимуществ, связанных с существенным уменьшением количества гелия, требующегося для заполнения системы.

Существуют две основные разновидности циркуляционных систем криостатирования, отличающиеся фазовым состоянием криоагента. В одних подвод тепла к циркулирующему гелию не вызывает фазового перехода, в других этот процесс происходит при кипении парожидкостного потока. Также возможно применение и комбинированных систем, когда в одной части схемы присутствует только поток однофазного жидкого гелия, а в другой — двухфазный поток. Для нуклотрона был выбран способ криостатирования сверхпроводящих магнитов посредством циркуляции парожидкостного потока гелия.

Изначально в ступень окончательного охлаждения КГУ-1600/4,5 входил парожидкостный турбодетандер. Но, как уже отмечалось, при криостатировании сверхпроводящих магнитов циркуляцией потока кипящего гелия по параллельным каналам имеются трудности с равномерным распределением потоков в них. Для нуклотрона, конечно, принимались меры по обеспечению одинаковых гидравлических характеристик магнитов, но частота повторения случаев потерь сверхпроводимости все-таки была достаточно велика. Более того, обеспечение равномерного распределения потоков криоагента в каналах требовало дополнительных затрат энергии, так как, чтобы поддержать работоспособность системы, приходилось дополнительно включать несколько компрессорных машин. Если эту проблему можно было бы устранить простой заменой парожидкостного турбодетандера на струйный аппарат (уже известное ранее техническое решение [2, 3]), то это привело бы к значительному — более чем в 1,5–2 раза — снижению холодопроизводительности рефрижераторов. При более детальном изучении ситуации оказалось, что на струйный аппарат достаточно отводить только около 10 % потока сжатого гелия, чтобы массовый расход жидкого криоагента, прокачиваемого через сверхпроводящие магниты ускорителя, возрос в достаточной мере. Остальные 90 %, как и ранее, расширяются в турбодетандере.

Струйный аппарат исключительно прост, имеет ничтожную стоимость, обладает практически неограниченным ресурсом и не требует обслуживания в процессе эксплуатации. Важное преимущество насоса струйного типа заключается в том, что такой аппарат с оптимальными для каждого потребителя параметрами может изготавливаться в любой мастерской и поставляться в очень короткий срок. При этом отпадает необходимость разработки сложных механических устройств, работающих при температуре жидкого гелия, их испытания и освоения в промышленности.

## 2. РАСЧЕТ СТРУЙНОГО АППАРАТА

Схема струйного аппарата представлена на рис. 2. Методика расчета применительно к условиям жидкого гелия разработана и экспериментально проверена в [2, 3]. Принцип действия такого аппарата состоит в том, что поток сжатого газа  $G_1$  разгоняется в сопле и при дальнейшем движении увлекает за собой инжектируемый поток  $G_2$ . В камере смешения скорости потоков выравниваются. Смешанный поток  $G_3$ , выходящий из камеры смешения, расширяется в диффузоре, при этом снижается его скорость, и статическое давление смешанной среды повышается до давления заторможенного потока.

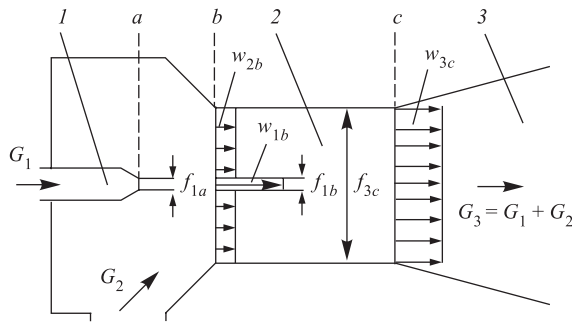


Рис. 2. Схема струйного насоса: 1 — сопло; 2 — цилиндрическая камера смешения; 3 — диффузор

Отношение расхода инжектируемого потока к расходу рабочего потока называют *коэффициентом инжекции*:

$$u = G_2/G_1. \quad (1)$$

Теория струйного насоса основана на использовании уравнения импульсов и коэффициентов скоростей, учитывающих потери в различных частях аппарата. Из совместного решения уравнения импульсов для цилиндрической камеры смешения, уравнения Бернулли и уравнения неразрывности можно получить выражение для напора  $\Delta p = p_3 - p_2$  струйного аппарата, называемое *уравнением характеристики*:

$$\Delta p = \frac{w_{1a}^2 f_{1a}}{V_{1a} f_{3c}} \left[ \varphi_2 + u^2 \frac{f_{1a}}{f_{2b}} \frac{V_2}{V_{1a}} \left( \varphi_2 - \frac{0,5}{\varphi_4^2} \right) - (1 + u^2) \frac{f_{1a}}{f_{3c}} \frac{V_3}{V_{1a}} (1 - 0,5\varphi_3^2) \right], \quad (2)$$

где  $\Delta p$  — напор струйного насоса;  $p$  — давление;  $\varphi_1 = 0,94$ ,  $\varphi_2 = 0,97$ ,  $\varphi_3 = 0,90$ ,  $\varphi_4 = 0,92$  — коэффициенты скоростей соответственно сопла, камеры смешения, диффузора и входного участка камеры смешения;  $G$  — массовый расход;  $w$  — скорость;

$f$  — площадь сечения;  $V$  — удельный объем. Цифровой индекс относится к потоку, буквенный указывает сечение аппарата.

Следует отметить, что выражение (2) получили, пренебрегая взаимодействием рабочего  $G_1$  и инжектируемого  $G_2$  потоков при их течении до входного сечения  $b$  цилиндрической камеры смешения, т. е. считая, что сечения  $a$  и  $b$  совмещены, и рассматривая инжектируемую и смешанную среды как несжимаемые.

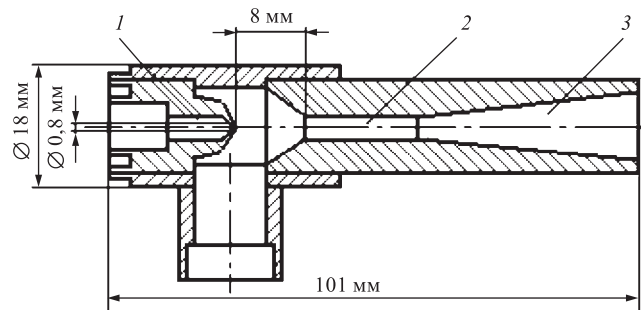


Рис. 3. Струйный насос: 1 — сопло; 2 — цилиндрическая камера смешения; 3 — диффузор

На рис. 3 представлен чертеж разработанного нами струйного аппарата, в котором активный поток  $G_1$  составляет около 10% от расхода сжатого гелия, поступающего в парожидкостный турбодетандер гелиевого рефрижератора КГУ-1600/4,5.

### 3. СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ

Схема измерения дополнительного потока жидкого гелия представлена на рис. 4.

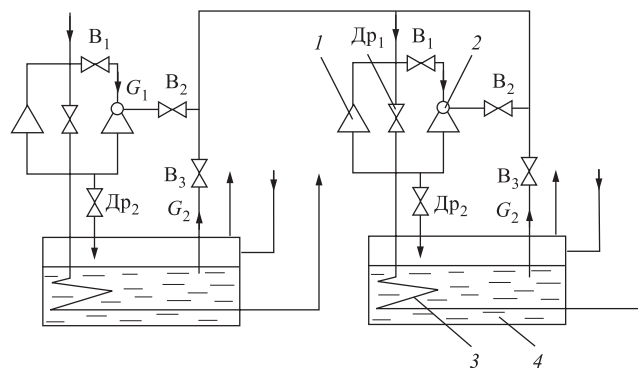


Рис. 4. Схема измерений циркуляции парожидкостного потока гелия: 1 — парожидкостный турбодетандер; 2 — струйный насос; 3 — переохладитель; 4 — испаритель; Др<sub>1</sub>, Др<sub>2</sub> — дроссели; В<sub>1</sub>, В<sub>2</sub>, В<sub>3</sub> — вентили

Определение массового расхода отводимого из сборника жидкого гелия  $G_2$  осуществлялось с использованием соотношения

$$G_2 = \rho_{\text{ж}} \frac{dV}{dt}, \quad (3)$$

где  $dV/dt$  — скорость изменения объема жидкой фазы в сборнике;  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости при давлении в сборнике. Скорость изменения объема определяется по скорости изменения уровня жидкого гелия в сборнике КГУ-1600/4,5. В качестве исходного при проведении измерений устанавливался такой режим, при котором уровни жидкого гелия постоянны в сборниках обеих рефрижераторных установок. После этого на одной из них закрывался вентиль В<sub>3</sub>. Струйный насос второй установки начинает откачивать жидкий гелий из сборника первой по соединяющему их трубопроводу; при этом растет уровень жидкого гелия в сборнике второй и, соответственно, падает в сборнике первой установки. Таким образом, можно определить скорость изменения объема жидкого гелия либо по падению, либо по росту уровня в одном из сборников. Массовый расход отводимого из сборника жидкого гелия  $G_2$  определялся для струйных насосов обеих установок.

При перекачке гелия с одной установки на другую теплопритоки к криоагенту могут быть достаточно большими, что может привести к возникновению ситуации, когда на вход насоса поступает не однофазный, а двухфазный гелий. Расчетные же значения массового расхода инжектируемого потока были получены для случая жидкого гелия. Поэтому для более точного соответствия расчетных и экспериментальных данных было обеспечено поступление на вход струйного насоса непосредственно однофазного гелия за счет введения теплозащитного экрана с жидким азотом.

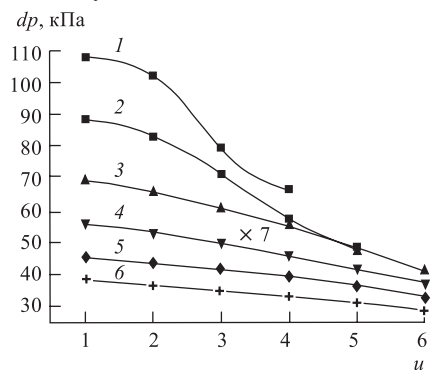
В ходе эксперимента струйный аппарат был также проверен на возможность возникновения предельного режима [4]. Предельный режим наступает тогда, когда в каком-либо сечении камеры смешения скорость инжектируемого или смешанного потока достигает критического значения. Такой режим может возникнуть как на участке камеры смешения, на котором рабочий и инжектируемый потоки имеют различные скорости (первый и второй предельные режимы), так и на участке, где движется смешанный поток с выравненным профилем скоростей (третий предельный режим).

Чтобы определить, какой максимальный коэффициент инжекции может достигаться при соответствующих размерах струйного аппарата и

Рис. 5. Зависимость напора струйного аппарата от коэффициента инжекции: 1 — диаметр  $d_{3c} = 3$  мм; 2 —  $d_{3c} = 3,5$  мм; 3 —  $d_{3c} = 4$  мм; 4 —  $d_{3c} = 4,5$  мм; 5 —  $d_{3c} = 5$  мм; 6 —  $d_{3c} = 5,5$  мм; 7 — экспериментальная точка

данных рабочих параметрах, был полностью открыт дроссель Др<sub>2</sub>. При этом напор струйного аппарата  $\Delta p = p_3 - p_2$  становится минимальным.

Эксперимент и дальнейшая обработка его результатов показали, что предельные режимы не возникают. Массовый расход инжектируемого потока  $G_2$  составил 10–21 г · с<sup>-1</sup>. Максимальный коэффициент инжекции, полученный при минимальном напоре струйного аппарата, составил  $u = 4,3$ .



На рис. 5 представлены зависимости напора насоса от коэффициента инжекции для различных значений диаметра цилиндрической камеры смещения. Нами использовался эжектор с диаметром камеры смещения  $d_{3c} = 3,5$  мм. Расчетные кривые были получены по уравнению характеристики (2). Экспериментальная точка, соответствующая минимальному напору струйного аппарата, также представлена на графике. Видно, что коэффициент инжекции для такого диаметра  $d_{3c}$  несколько меньше расчетных результатов. В дальнейшем это несоответствие расчетных и экспериментальных данных планируется устранить либо за счет более тщательного проведения экспериментов, либо за счет уточнения теории.

Однако уже получен важный результат: достигнутые значения массового расхода инжектируемого потока обеспечили более устойчивую работу сверхпроводящей магнитной системы ускорителя и снижение затрат энергии.

## ВЫВОДЫ

За счет увеличения расхода гелия через магниты при дополнительной циркуляции обеспечивается более равномерное распределение низкой температуры по периметру кольца и, следовательно, более устойчивая работа сверхпроводящей магнитной системы нуклотрона. Кроме того, использование струйных насосов в схеме криостатирования нуклотрона позволило существенно снизить затраты энергии (не менее чем на 0,6 МВт). В этом случае не требуется включать дополнительные компрессоры, как это было бы в схеме без струйных аппаратов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов Н. Н., Коваленко А. Д., Малахов А. И. Нуклотрон: основные результаты и планы развития // АЭ. 2002. Т. 93, вып. 6. С. 479–485.
2. Agapov N. N. et al. Study of a Liquid Helium Jet Pump for Circulating Refrigeration Systems // Cryogenics. 1978. V. 18. P. 491–493.
3. Agapov N. N. et al. Study of Jet Pump for Circulating a Helium Two-Phase Mixture // Cryogenics. 1980. V. 20. P. 200–202.
4. Бродянский В. М., Соколов Е. Я. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981. 320 с.

Получено 13 октября 2003 г.