

УДК 621.515

Гелиевая винтовая компрессорная установка ГВ 110/30 для криогенной системы ускорительно-накопительного комплекса NICA

Д-р техн. наук **И.Г.ХИСАМЕЕВ**,
ОАО «Казанькомпрессормаш», e-mail: compr@kazan.ru
Г.Ф.ЗИСКИН, ЗАО «НИИТурбокомпрессор им.В.Б. Шнеппа», e-mail: niitk@kazan.ru
Д-р техн. наук **Н.Н.АГАПОВ**, **Д.С.ШВИДСКИЙ**,
Объединенный институт ядерных исследований,
Лаборатория физики высоких энергий им.В.И.Векслера
и А.М.Балдина, г.Дубна, e-mail: main@ihe.jinr.ru
В.А.ГРИШИН, Рижский технический колледж,
e-mail: viktor.grisins@rtk.lv

NICA — новый ускорительный комплекс, который будет сооружен в течение ближайших 5 лет в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Он создается на базе технологий, примененных в Нуклотроне, а также включает новые технические решения.

Криогенная система проекта NICA базируется на существующем оборудовании для сжижения гелия, созданном для ускорителя Нуклотрон. После модернизации производительность этого оборудования будет удвоена путем ввода в работу новых дополнительных гелиевых винтовых компрессоров ГВ 110/30, разработанных и изготовленных в ЗАО НИИТУРБОКОМПРЕССОР, г.Казань. Двухступенчатая винтовая компрессорная установка ГВ 110/30 будет иметь давление на нагнетании 3 МПа и производительность 6600 м³/ч (при нормальных условиях).

В статье описываются новые технические решения, примененные в винтовой компрессорной установке ГВ 110/30 («Каскад 110/30»).

Ключевые слова: гелиевая винтовая компрессорная установка, ускорительный комплекс NICA, криогенная система, межступенчатое давление, золотниковый регулятор производительности.

HELIUM SCREW COMPRESSOR PLANT GV110/30 FOR CRYOGENIC SYSTEM OF NICA ACCELERATOR COMPLEX

Doctor of science I.G.Khisameev, G.F.Ziskin, doctor of science N.N.Agapov, D.S.Shvidky, V.A.Grishin.

NICA is the new accelerator complex being constructed in the coming 5 years at the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna. It builds on the experience and technological developed at the Nuclotron facility and incorporates new technological concepts.

Cryogenic system for the NICA facility will be based on the existing liquid helium plant which was constructed for the Nuclotron. After modernization, the capacity of this plant will be increased from 4000 to 8000 W at 4.5 K. Doubling of the refrigerator capacity will be achieved by the use new additional screw helium compressors GV 110/30 designed and manufactured by the Kazan firm NIITURBOKOMPRESSOR. This two stage screw machine will have outlet pressure of 3 MPa and capacity of 6600 m³/h (under normal conditions).

Novel technical solutions of the screw helium compressors GV 110/30 («Kaskad 110/30») are described.

Key words: helium screw compressor plant, NICA accelerator complex, cryogenic system, interstage pressure, spool valve capacity regulator.

Для физики высоких энергий первостепенное значение имеет возможность формирования магнитных полей в исследовательских установках посредством сверхпроводимости. Необходимые при этом температуры вблизи абсолютного нуля могут быть достигнуты только с применением жидкого гелия. Первый в Европе сверхпроводящий ускоритель тяжелых ионов Нуклотрон работает в г. Дубна с 1993 г.

Одной из основных систем Нуклотрона (рис. 1) является криогенная система, обеспечивающая его работоспособность. Она служит для отвода тепла, выделяющегося в обмотках сверхпроводящих магнитов при изменении магнитного поля и при торможении рассеянных ускоренных частиц, а также тепла, поступающего из окружающей среды через теплоизоляцию, токовводы, опоры и подвески.

Весь комплекс проблем, возникающих при создании подобных систем, можно условно разделить на две части. Для первой из них, связанной с криостатируемой сверхпроводящей магнитной системой ускорителя, важны равномерное распределение низкой температуры по всему периметру, эффективность использования холода (минимизация теплопритоков и тепловыделений), безопасность эвакуации энергии магнитного поля; для второй — энергетическая эффективность получения холода, многорежимность, высокий уровень надежности.

Поэтому к системе предъявляются жесткие требования как по энергоэффективности, так и по надежности.

Для Нуклотрона был создан крупнейший в России криогенный гелиевый комплекс [1, 3] холодопроизводительностью 4000 Вт при температуре 4,5 К. Система криогенного обеспечения Нуклотрона отличалась целым рядом новых технических идей и решений, никогда ранее не применявшихся в мировой практике: это быстроциклирующие сверхпроводящие магниты; криостатирование двухфазным паром



Рис. 1. Сверхпроводящий ускоритель тяжелых ионов Нуклотрон

жидкостным потоком гелия; экстремально короткое время охлаждения системы до рабочих температур; параллельное соединение по криоагенту сотен сверхпроводящих магнитов; турбины, работающие на жидком гелии, и др. Каждое из перечисленных решений — новый важный шаг в развитии криогенной гелиевой техники.

Важнейшую роль в создании и дальнейшей эксплуатации Нуклотрона сыграла гелиевая компрессорная установка «Каскад 80/25», выполненная как двухступенчатая винтовая машина [2]. Впервые в двух винтовых ступенях осуществлялось сжатие гелия до 2,5 МПа.

Винтовая компрессорная установка «Каскад 80/25» — это машина второго поколения отечественных винтовых компрессорных установок, используемых в криогенных системах для компримирования гелия.

Впервые винтовые компрессорные установки были использованы для сжатия гелия в криогенной системе «Токамак-15» Института атомной энергии им. Курчатова. Компрессорная установка состояла из двух двухступенчатых агрегатов «Каскад 40/16» и дожимающего компрессорного агрегата «Каскад 6/16-25».

В отличие от установки для Токамака «Каскад 80/25» был выполнен в виде двухступенчатой машины. Он предназначался для системы криогенного обеспечения ускорительно-накопительного комплекса УНК, создававшегося в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) в г. Протвино. Для этого сооружения предполагалось выпустить серию из 60 таких установок.

Опытный образец был установлен в ОИЯИ (г. Дубна), где прошел всесторонние испытания и доводку, был сдан Межведомственной комиссии и рекомендован для серийного производства, после чего ОАО «Казанькомпрессормаш» выпустило и поставило в ИФВЭ 4 установки «Каскад 80/25».

В связи со свертыванием всех работ по УНК дальнейший выпуск установок был прекращен, а опытный образец после испытаний и доводки был оставлен для эксплуатации в системе криогенного обеспечения Нуклотрона.

В 2004 г. одна из четырех установок, изготовленных для ИФВЭ, силами ОИЯИ была смонтирована и при участии специалистов ЗАО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» запущена в эксплуатацию параллельно с уже действующей.

На рис. 2 приведен общий вид компрессорной установки «Каскад 80/25».

В ближайшие 5 лет на базе ускорителя Нуклотрон будет создан комплекс ускорителей, включающий сверхпроводящий коллайдер NICA [4], обеспечивающий столкновение высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов вплоть до золота Au^{+79} . Криогенная система ускорительного комплекса NICA создается путем модернизации существующего оборудования для криогенного обеспечения Нуклотрона. Цель модернизации — повышение вдвое (до 8000 Вт) холодопроизводительности на температурном уровне 4,5 К. Такая холодопроизводительность обеспечит процессы криостатирования и охлаждения до рабочей температуры всех составных частей комплекса: Нуклотрона, бустера и коллайдера.

Для удвоения холодопроизводительности криогенной системы в дополнение к двум криогенным гелиевым рефрижераторам КГУ-1600/4,5 устанавливается ожижитель гелия ОГ-1000 производительностью по жидкому гелию около 1000 л/ч. Естественно, что удвоение холодопроизводительности требует увеличения вдвое производительности всего компрессорного оборудования.

Учитывая в первую очередь высокую надежность эксплуатируемых в настоящее время в системе криогенного обеспечения Нуклотрона компрессорных установок «Каскад 80/25», а также многолетнее плодотворное сотрудничество, принято решение заказать дополнительное компрессорное оборудование в ОАО «Казанькомпрессормаш».

Новая компрессорная установка (КУ) ГВ 110/30 («Каскад 110/30») была спроектирована с использованием многолетнего опыта эксплуатации КУ «Каскад 80/25» и с учетом требований, предъявляемых к ускорительному комплексу NICA.



а



б

Рис. 2. Компрессорная установка «Каскад 80/25»: а — 1-я ступень; б — 2-я ступень

Таблица 1

Сравнительные технические характеристики
КУ «Каскад 80/25» и ГВ 110/30 («Каскад 110/30»)

Характеристики	"Каскад 80/25"	ГВ 110/30 ("Каскад 110/30")
Объемная производительность (по условиям всасывания), м³/мин (м³/ч)	84 (5040)	110 (6600)
Давление нагнетания, МПа	2,5	3
Давление всасывания, МПа	0,1	0,1
Число компрессоров:		
1-я ст.	2	2
2-я ст.	1	1
Диаметр роторов, мм:		
1-я ст.	315	315
2-я ст.	250	250
Отношение длины нарезной части ротора к диаметру L/D:		
1-я ст.	1,35	1,5
2-я ст.	1	1,35
Установленная мощность электродвигателей, кВт:		
1-я ст.	800	2×400
2-я ст.	630	800

Кроме того, за эти годы в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа» был накоплен значительный опыт в проектировании газовых винтовых компрессоров для сжатия различных газов, который также был учтен при проектировании установки.

По своим техническим характеристикам «Каскад 110/30» отличается от своего предшественника (табл. 1).

Как известно, основной задачей при проектировании многоступенчатых машин является правильный выбор межступенчатого давления, которое должно обеспечивать согласованную работу ступеней сжатия и энергетическую эффективность всей машины.

В табл. 2 представлены результаты расчета парамет-

Таблица 2
Результаты расчетов основных параметров

Параметры	Расчетные значения параметров при $p_{\text{пром}}$, МПа			
	0,5	0,6	0,7	0,8
1-я ступень				
Давление всасывания $p_{\text{вс1}}$, МПа	0,1	0,1	0,1	0,1
Давление нагнетания $p_{\text{н1}}$, МПа	0,52	0,62	0,72	0,82
Степень сжатия π	5,2	6,2	7,2	8,2
Объемный коэффициент η_v	0,9094	0,9078	0,9062	0,9046
Производительность по условиям всасывания $v_{\text{вс1}}$, м³/мин	56,36	56,27	56,17	56,07
Плотность всасываемого газа $\rho_{\text{вс}}$, кг/м³	0,166	0,166	0,166	0,166
Массовая производительность $G_{\text{вс1}}$, кг/мин	18,7	18,67	18,64	18,6
Плотность газа на нагнетании $\rho_{\text{н}}$, кг/м³	0,715	0,853	0,991	1,128
Производительность при условиях нагнетания $v_{\text{н1}}$, м³/мин	26,14	21,88	18,81	16,49
2-я ступень				
Давление всасывания $p_{\text{вс2}}$, МПа	0,52	0,62	0,72	0,82
Давление нагнетания $p_{\text{н2}}$, МПа	3	3	3	3
Давление на выходе из компрессора $p_{\text{вых}}$, МПа	3,04	3,04	3,04	3,04
Степень сжатия π_2	5,85	4,9	4,22	3,71
Объемный коэффициент η_{v2}	0,816	0,827	0,835	0,84
Производительность по условиям всасывания $v_{\text{вс2}}$, м³/мин	23,62	23,94	24,17	27,44
Плотность всасываемого газа $\rho_{\text{вс2}}$, кг/м³	0,715	0,853	0,991	1,128
Массовая производительность по условиям всасывания $G_{\text{вс2}}$, кг/мин	16,9	20,42	23,95	27,44
Плотность газа на нагнетании $\rho_{\text{н2}}$, кг/м³	3,952	3,952	3,952	3,952
Производительность при условиях нагнетания $v_{\text{н2}}$, м³/мин	4,277	5,168	6,059	6

ров 1-й (индекс 1) и 2-й (индекс 2) ступеней сжатия при различных межступенчатых давлениях.

На основании проведенных расчетов был построен график зависимости массовой производительности 1-й и 2-й ступеней от промежуточного (межступенчатого) давления (рис. 3).

Как видно из приведенного графика, величина промежуточного давления должна составлять 0,55 МПа.

Претерпело изменение и схемное решение установки. Так, в КУ «Каскад 80/25» оба компрессора

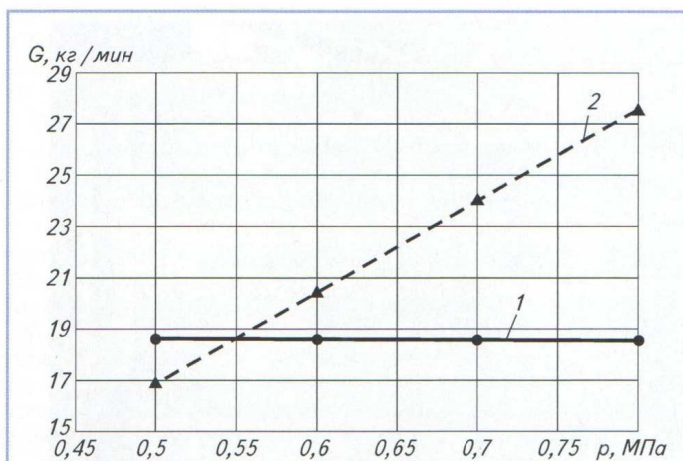


Рис. 3. Зависимость массовой производительности от промежуточного давления:
1 — 1-я ступень; 2 — 2-я ступень

Таблица 3
Основные технические характеристики компрессоров

Характеристики	Марка компрессоров			
	"Каскад 80/25"	305 НП 20/30	2ГМ 12/31	1ВУВ 45/150
Число компрессоров	2	3	2	4
Тип	Винтовой	Поршневой	Поршневой	Поршневой
Производительность (при условиях всасывания), м³/ч	5040	1200	840	45
Давление нагнетания, МПа	2,5	3	3,1	15
Установленная мощность электродвигателей, кВт	1-я ст. — 800 2-я ст. — 630	200	160	22
Напряжение питания электродвигателей, В	6000	380	380	380
Число ступеней сжатия	2	3	3	3
Частота вращения вала компрессора, об/мин	2970	500	740	620
Расход охлаждающей воды, м³/ч	60	15	7,2	1,5

1-й ступени были расположены на одной раме и приводились от одного электродвигателя. Между собой компрессоры соединялись через зубчатую муфту, помещенную в герметичный кожух. Такая компоновка позволяла значительно уменьшить габариты установки, что было оправдано для тех условий работы, в которых предполагалось их использовать. Наиболее интенсивное захлаживание системы происходит в течение первых 80–100 ч работы. После этого системе необходимо лишь поддерживать в рабочем состоянии. Планировалась поставка для УНК (г.Протвино) 60 таких установок с постепенным отключением части установок для поддержания рабочего состояния системы, что не оказывало резкого влияния на производительность всего комплекса.

В условиях же эксплуатации Нуклотрона отключение одной установки приводит к снижению производительности в 2 раза, что является недопустимым. Поэтому в состав компрессорного оборудования входят поршневые компрессоры, включающиеся в работу после отключения одной из КУ «Каскад 80/25» для компенсации недостающей производительности и служащие для ступенчатого регулирования производительности всего компрессорного комплекса.

Основные технические характеристики используемых компрессоров приведены в табл. 3.

Применение разных типов компрессоров весьма неудобно в эксплуатации, кроме того, у поршневых компрессоров невысокий межремонтный период, что также затрудняет работу комплекса.

При рассмотрении основных технических решений для КУ ГВ 110/30 («Каскад 110/30») было предложено разместить компрессоры 1-й ступени на отдель-

ных рамах с собственными электродвигателями, что даст возможность выводить из работы каждый компрессор в отдельности.

Кроме того, компрессоры 1-й ступени оснащаются золотниковыми регуляторами производительности, что позволяет решить сразу несколько задач:

- обеспечить разгруженный пуск установки, так как при пуске золотники находятся в положении минимальной производительности;
- осуществлять плавный выход на расчетный режим и в процессе работы в широком диапазоне менять производительность установки.

Для нормальной работы маслосистемы в схему установки вводится пусковой маслосос, поддерживающий давление в маслосистеме до выхода установки на рабочий режим.

Была изменена и система управления компрессорной установки, которая сейчас строится на базе контроллера Contrologix фирмы Allen Bradley.

Контроллер Contrologix соединяет в себе высокую надежность и большие функциональные возможности, в частности при необходимости можно изменять настройки и алгоритм работы без остановки технологического процесса. Контроллер комплектуется графической промышленной цветной жидкокристаллической панелью оператора, которая обеспечивает высокую эффективность и широкие функциональные возможности при управлении компрессором. АСУ ТП верхнего уровня по интерфейсу может запрашивать и визуализировать в виде мнемосхем и таблиц всю необходимую информацию о работе установки.

Вибродатчики, размещенные на предусмотренных в конструкции компрессора площадках, позволят отслеживать вибросостояние компрессоров, а датчики осевого сдвига роторов — избежать аварийных ситуаций.

Хотелось бы отметить, что в настоящее время параллельно ведутся в том же ключе работы по проектированию системы автоматизации для КУ «Каскад 80/25».

В настоящее время разработана рабочая конструкторская документация на компрессорную установку, которая передана в производство. Компрессорная установка ГВ 110/30 («Каскад 110/30») имеет Сертификат соответствия и Разрешение на применение данного вида оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аганов Н.Н. Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер — Нуклотроне // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1999. Т. 30. Вып. 3.
2. Назмутдинов Р.М. и др. Гелиевая винтовая компрессорная установка «КАСКАД 80/25» // Химическое и нефтяное машиностроение. 1991. № 1.
3. Agapov N.N. et al. Cryogenic system of the Nuclotron — a new superconducting synchrotron. // Advances in Cryogenic Engineering. 1994. V. 39.
4. Nuclotron-based ion collider facility, <http://nica.jinr.ru/>.