

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.384.6

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA¹

© 2024 г. М. И. Брызгунов^{a,b,*}, А. В. Бублей^a, А. Д. Гончаров^a,
А. П. Денисов^a, В. И. Кремнев^a, В. В. Пархомчук^a, В. М. Панасюк^a,
А. В. Петрожитский^a, В. Б. Рева^{a,b}, Н. С. Кремнев^a, С. В. Шиянков^a,
А. А. Путьмаков^a, В. М. Константинов^a, П. Е. Мураткозиев^a,
В. Г. Ческидов^a, В. Я. Корчагин^a, С. П. Посполита^a, Л. С. Посполита^a,
В. А. Полухин^a, Г. И. Эрг^a, С. И. Рувинский^a, О. В. Беликов^a,
В. А. Чекавинский^a, Л. М. Щеголев^a, Д. Н. Скоробогатов^a, И. А. Гусев^a,
Д. В. Сеньков^{a,b}, Д. Н. Пурескин^a, К. М. Горчаков^{a,b}, Р. В. Вахрушев^a,
А. М. Батраков^a, К. С. Штро^a, А. В. Павленко^a, М. Н. Кондауров^a,
Г. В. Карпов^a, М. Г. Федотов^{a,b}, Е. А. Бехтенов^a, А. В. Иванов^a,
А. А. Жариков^a

^aИнститут ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

^bНовосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 02.03.2024 г.

Принята к публикации 21.03.2024 г.

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц «RuPAC'23», Новосибирск.

В ИЯФ СО РАН продолжается создание высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA, необходимой для достижения проектной светимости комплекса в ион-ионных столкновениях. Система состоит из двух независимых охладителей для энергии электронов до 2.5 МэВ и током до 1 А, которые одновременно охлаждают два встречных ионных пучка. Описывается состояние дел в реализации данной системы и приведены результаты разработки и испытаний части элементов и подсистем охладителей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Система электронного охлаждения для коллайдера NICA состоит из двух практически независимых охладителей для независимого охлаждения обоих ионных пучков (рис. 1). Каждый охладитель имеет свою высоковольтную систему (размещенную в баке с элегазом), транспортные каналы и секцию охлаждения [1]. При конструировании охладителей за основу была взята конструкция высоковольтной системы электронного охлаждения для синхротрона COSY (г. Юлих, Германия), разработанная в ИЯФ ранее [2].

Рис. 1. а – Трехмерная модель СЭО коллайдера NICA.

Высоковольтные системы охладителей отвечают за генерацию электронного пучка, ускорение его до рабочей энергии, а после взаимодействия с ионным пучком – за торможение и поглощения его в специальном электронном коллекторе. Каждая высоковольтная система состоит из колонны, отвечающей за создания основного ускоряющего напряжения (до 2.5 МВ) и высоковольтного терминала сверху. Высоковольтная колонна состоит из идентичных секций, содержащих высоковольтные источники на полное напряжение до 60 кВ, две катушки магнитного поля для ускоряющей и тормозящей электростатических трубок и электронику для управления источниками. В центре колоны размещена специальная промежуточная секция, которая установлена для удобства сборки. Данная секция не имеет высоковольтных источников, но в ней есть пикапы для удобства проводки пучка в ускорятельных трубках и дополнительная вакуумная откачка для обеспечения высокого вакуума в трубках и в области катода пушки.

Высоковольтный терминал содержит пушку, коллектор и электронику для управления ими. В охладителях, разработанных в ИЯФ СО РАН, ранее применялась электронная пушка с катодом диаметром 3 см [3]. Такой размер катода (и, соответственно, пучка) оправдан для охладителей на низкую энергию. Однако в коллайдере NICA размеры ионных пучков за счет ускорения гораздо меньше, поэтому было решено разработать пушку с диаметром катода 1 см [4]. К преимуществам такой пушки можно отнести более простую проводку пучка через систему. Кроме того, меньший размер пучка означает большую плотность тока при том же токе пучка, что позволит увеличить силу трения, не меняя источники питания.

Разработка такой сложной системы подразумевает проектирование и изготовление большого числа различных элементов и подсистем, которые нужно испытать и при

необходимости измерить. Результатам разработки и испытаний части элементов и подсистем охладителей посвящена данная статья.

2. ПОУЗЛОВАЯ СБОРКА ТРАНСПОРТНЫХ КАНАЛОВ

Сборка и запуск столь большой системы подразумевает выделение для этих нужд достаточно большого радиационно-защищенного помещения со всеми инженерными коммуникациями, что связано с серьезными трудностями. Поэтому было решено, что полная сборка системы будет проводиться только в ОИЯИ непосредственно на своем штатном месте в коллайдере. Однако в ИЯФ планируется провести поузловую сборку всех элементов системы.

На рис. 2 показана сборка элементов под высоковольтным баком нижнего охладителя. Здесь можно увидеть подставку под бак, два вертикальных 90-градусных поворотных соленоида (синие) со стоящими сверху согласующими секциями (красные вверху), один горизонтальный 90-градусный поворотный соленоид, короткий соленоид типа Insert (красный внизу) и два соленоида большого диаметра Line-08 (желтые горизонтальные соленоиды), необходимых для размещения в них элементов вакуумной откачки, датчиков положения пучка (пикапов) и для сборки вакуумной камеры.

Рис. 2. Частичная сборка транспортного канала нижнего охладителя

Такая же поузловая сборка проводилась для элементов верхнего охладителя под высоковольтным баком. После проверки обе сборки были разобраны, упакованы и перевезены в ОИЯИ.

На рис. 3 показаны сборки элементов других частей транспортного канала (участки с горизонтальными 90-градусными поворотами слева и справа от высоковольтных баков на рис. 1а). В данном случае сборки имеют два уровня, т.е. содержат в себе элементы обоих охладителей, однако по конструкции они установлены на одной опоре для экономии места.

Рис. 3. Сборки участков транспортных каналов с горизонтальными поворотами.

3. МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Поступающие из производства магнитные элементы охладителя проходят тепловые испытания на полную номинальную мощность и магнитные измерения [5]. Для магнитных измерений транспортных каналов используется трехкомпонентный датчик Холла (микросхема MV2 от компании Metrolab). Данный датчик устанавливается на специальную каретку, которая двигается внутри немагнитной направляющей, помещаемой внутрь элемента. Рельса изготовлена по модульной схеме и собирается под конкретную задачу из

набора простых элементов: прямые разной длины, 90-градусные изогнутые направляющие (радиус траектории датчика 100 см) и 45-градусные изогнутые рельсы (с таким же радиусом).

В рамках испытаний, в частности, были завершены измерения всех восьми 90-градусных поворотных соленоидов (четыре горизонтальных и четыре вертикальных). На рис. 4 показан один из вертикальных поворотных магнитов в процессе измерений. Для первого магнита проводились полномасштабные измерения, в ходе которых проверялось распределение поля с присоединенными соседними элементами, влияние соседних элементов на поле в повороте, градиенты ведущего и поворотного полей (определялись специальным датчиком, содержащим 12 независимых датчиков Холла). Данные подробные измерения позволили сравнить измерения с расчетами с целью определения ошибок моделирования и конструирования.

Рис. 4. Система магнитных измерений в вертикальном поворотном магните.

Последующие испытания магнитов такого типа проводились для отдельных магнитов без соседних элементов с измерением полей только на оси системы. Такие измерения позволили определять ошибки изготовления каждого конкретного элемента. В подробных измерениях нет необходимости, так как все восемь элементов однотипны с магнитной точки зрения и сравнения поля на оси с измерениями первого элемента достаточно для выявления ошибок.

На рис. 5 показаны результаты измерений продольного и поворотного магнитных полей для всех восьми элементов после исправления всех ошибок. Видно, что все восемь графиков ложатся практически в одну кривую. Небольшие различия в амплитуде можно объяснить тем, что параллельно с магнитами проходили испытания их источников питания. Поэтому разные измерения могли проводиться с разными источниками питания, в результате чего реальные значения тока в разных измерениях могли немного различаться.

Рис. 5. Результаты измерений продольного (а) и поворотного (б) полей во всех восьми 90-градусных соленоидах.

Помимо 90-градусных соленоидов, так же проведены испытания многих других уже изготовленных элементов, таких как соленоиды Line-08, Match и InsMatch, Line-20, корректоры EDIP и т.д.

4. КАСКАДНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

При проектировании систем электронного охлаждения, как и при проектировании многих электростатических ускорителей, стоит задача передачи мощности оборудованию, находящемуся под высоким напряжением. Для систем электронного охлаждения на низкую

энергию эта задача часто решается при помощи развязывающего трансформатора, обеспечивающего изоляцию на большое напряжение между первичной и вторичной обмотками. Однако для высоковольтных систем такой способ не подходит и приходится использовать другие методы. В системе электронного охлаждения для коллайдера NICA используется метод, опробованный на охладителе COSY – каскадный трансформатор [6]. Такой метод позволяет передавать мощность в десятки киловатт под потенциал в несколько МВ. В основе такого метода лежит использование серии развязывающих трансформаторов на 60 кВ, соединенных последовательно так, чтобы вторичная обмотка одного соединялась с первичной обмоткой следующего. При этом на каждом каскаде можно сделать отдельную небольшую обмотку, которая будет питать электронику в каждой секции ускорителя. В отличие от трансформатора COSY, в охладителе NICA было решено разбить трансформатор на две половины, которые соединяются в промежуточной секции в центре высоковольтной колонны. Такое решение позволило сократить длину одного модуля, что упрощает его сборку и транспортировку. Поскольку в каждом охладителе стоят по два трансформатора, состоящие из двух модулей, то на всю систему необходимо восемь модулей. На электронику каждой секции требуется только одна обмотка отбора мощности, выведенная от одного из двух трансформаторов в колонне. Поскольку намотка и вывод этих обмоток наружу является достаточно кропотливой работой, то было решено делать модули двух типов (с обмотками и без них). На рис. 6 показана фотография одного модуля с обмотками отбора мощности.

Рис. 6. Модуль каскадного трансформатора с обмотками отбора мощности.

На данный момент изготовлены и испытаны все восемь модулей, необходимых для системы. На рис. 7 показаны результаты измерений амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) между входом и выходом трансформатора и коэффициента передачи напряжения от входа до каждой секции на резонансной частоте.

Рис. 7. АЧХ для всех восьми модулей каскадного трансформатора (а) и коэффициент передачи по напряжению в секции на резонансной частоте (б).

На графиках АЧХ видно, что семь кривых практически совпадают, т.е. резонансные частоты и коэффициенты передачи у этих трансформаторов очень близки. Выпадает из общей массы только трансформатор №2, у которого резонансная частота близка к остальным, однако коэффициент передачи на 5–10 % ниже. Для графика измерения коэффициента передачи на разные секции так же видно, что значения для трансформатора №1 лежат ниже остальных. Причем, исходя из того, что на графике АЧХ его кривая не выделяется на фоне других, можно утверждать, что причина более низких коэффициентов передачи по секциям не связана с проблемами в основных обмотках или с в сердечниках из

аморфного железа. В настоящее время идет исследование причин особенностей этих двух трансформаторов.

5. ПЛОЩАДКА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Для работ с высоковольтными системами охладителей необходимо иметь возможность разместить человека с оборудованием около высоковольтных колон на высоте нескольких метров. Причем высота может варьироваться в зависимости от высоты того места в системе, к которому требуется доступ. Для этого на охладителе COSY была изготовлена специальная двухъярусная площадка обслуживания, которая устанавливалась на постоянной основе и полностью окружала высоковольтную систему. Высоковольтный бак имеет гораздо больший диаметр чем высоковольтная колонна, поэтому для его установки площадка обслуживания частично разбиралась, т.е. вынимался специальный вкладыш на втором ярусе, освобождавший место под бак. Такой подход со стационарной площадкой оказался очень удобным для сборки, ремонта и обслуживания высоковольтной системы. Все операции с баком и с высоковольтной системой удобно проводить с этой площадки, а работать на высоте в несколько метров на стационарной площадке гораздо удобнее, чем, например, на стремянке. Поэтому для охладителя NICA было решено разработать такую же стационарную площадку обслуживания, окружающую оба бака.

На рис. 8 (слева) показана схема площадки охладителя NICA и баки внутри нее. Сама площадка установлена на плиты радиационной защиты. На случай, если на момент сборки охладителей плиты еще не будут установлены, для площадки обслуживания предусмотрены дополнительные съемные опоры, которые устанавливаются на пол и поднимают всю конструкцию до высоты плит. На рис. 8 (справа) показана фотография площадки во время изготовления перед этапом покраски.

Рис. 8. Площадка обслуживания для высоковольтной системы.

После изготовления площадка обслуживания была разобрана, упакована в специальную тару и перевезена в ОИЯИ.

6. МАСЛЯНАЯ СИСТЕМА

В процессе работы оборудование высоковольтной системы выделяет достаточно большое количество тепла, которое необходимо выводить из бака. Для этого разрабатываются специальные масляные системы, обеспечивающие съем тепла при помощи трансформаторного масла. Всего изготавливаются две идентичные системы (по одной на каждый охладитель), каждая из которых содержит по пять контуров, отвечающих за охлаждение двух каскадных трансформаторов, электроники и магнитной системы

высоковольтной колонны, элементов высоковольтного терминала и коллектора электронов. Каждый контур может независимо регулироваться для обеспечения необходимого протока масла.

На рис. 9 показаны две масляные системы в процессе изготовления. На данный момент одна система полностью собрана и проходит гидравлические испытания. Вторая система находится на этапе сборки.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН продолжается разработка высоковольтной системы электронного охлаждения для коллайдера NICA. Проводятся испытания и измерения магнитных элементов системы. В частности, завершены испытания всех восьми 90-градусных поворотных магнитов. Выявленные при испытаниях недостатки были оперативно исправлены. Для высоковольтной системы изготовлены и испытаны все восемь модулей каскадного трансформаторов. Сравнение их характеристик показывает хорошую повторяемость, за исключением некоторых особенностей. Так же завершено или находится на этапе испытаний производство различных подсистем охладителей. Например, площадок обслуживания высоковольтных систем и масляных систем охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брызгунов М.И., Бублей А.В., Денисов А.П., Гончаров А.Д., Пархомчук В.В., Панасюк В.М., Рева В.Б., Кремнев Н.С., Путьмаков А.А., Беликов О.В., Горчаков К.М., Скоробогатов Д.Н., Чекавинский В.А., Бехтенов Е.А., Жариков А.А. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2020. Т. 17. № 4(229). С. 39.
2. Reva V., Alinovskiy N., Bedareva T., Bekhtenev E., Belikov O., Bocharov V., Borodich V., Bryzgunov M., Bublely A., Chekavinskiy V., Cheskidov V., Dietrich J., Dovzhenko B., Erokhin A., Fedotov M. et al. // Proc. of IPAC, Dresden, Germany. 2014. P. 777. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRI075>
3. Bublely A., Goncharov A., Ivanov A., Konstantinov E., Konstantinov S., Kryuchkov A., Panasyuk V., Parkhomchuk V., Reva V., Skarbo B., Smirnov B., Sukhina B., Tiunov M., Zakhvatkin M., Yang X. et al. // Proc. of EPAC-02. 2002. P. 1356.
4. Денисов А.П., Брызгунов М.И., Иванов А.В., Пархомчук В.В., Путьмаков А.А., Рева В.Б. // Письма в ЭЧАЯ. 2019. Т. 16. № 6(225). С. 666.
5. Рева В.Б., Батраков А.М., Брызгунов М.И., Бублей А.В., Вахрушев Р.В., Горчаков К.М., Гостеев В.К., Денисов А.П., Кондауров М.Н., Константинов В.М., Корчагин В.Я.,

Кремнев Н.С., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Посполита С.П. и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20. № 4(249). С. 957.

6. Брызгунов М.И., Гончаров А.Д., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Рева В.Б., Скоробогатов Д.Н. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 14. <https://doi.org/10.7868/S0032816215020160>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. а – Трехмерная модель СЭО коллайдера NICA: 1 – баки высоковольтной системы, 2 – секция охлаждения, 3 – вертикальный поворотный соленоид, 4 – горизонтальный поворотный соленоид, 5 – прямолинейная секция, 6 – тороидальная секция, 7 – подставка, 8 – кабельный канал. **б** – Высоковольтная система: 1 – бак с элегазом, 2 – нижний фланец бака, 3 – высоковольтная колонна, 4 – высоковольтный терминал, 5 – соленоид электронной пушки, 6 – соленоид электронного коллектора, 7 – коллектор, 8 – промежуточная секция, 9 – боковой фланец.

Рис. 2. Частичная сборка транспортного канала нижнего охладителя (элементы под высоковольтным баком).

Рис. 3. Сборки участков транспортных каналов с горизонтальными поворотами.

Рис. 4. Система магнитных измерений в вертикальном поворотном магните.

Рис. 5. Результаты измерений продольного (**а**) и поворотного (**б**) полей во всех восьми 90-градусных соленоидах.

Рис. 6. Модуль каскадного трансформатора с обмотками отбора мощности.

Рис. 7. АЧХ для всех восьми модулей каскадного трансформатора (**а**) и коэффициент передачи по напряжению в секции на резонансной частоте (**б**).

Рис. 8. Площадка обслуживания для высоковольтной системы: **а** – чертеж с установленными баками, **б** – фотография площадки в процессе изготовления перед покраской.

Рис. 9. Фотография масляных систем в процессе изготовления.

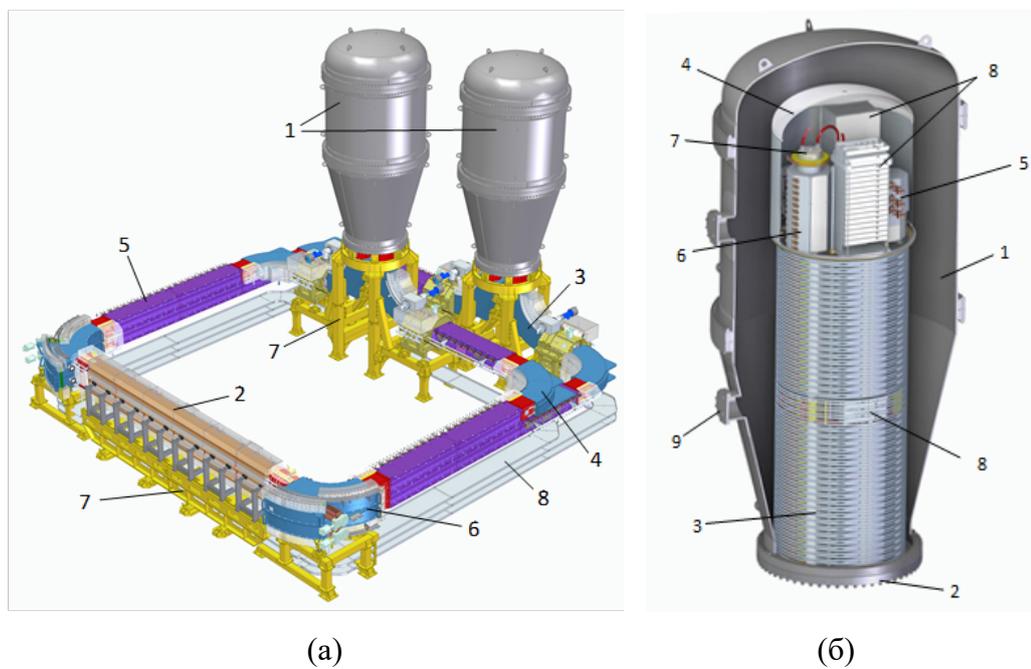


Рис. 1.



Рис. 2.



Рис. 3.

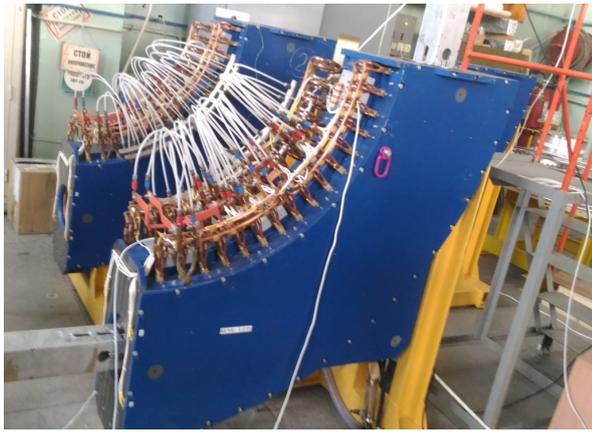
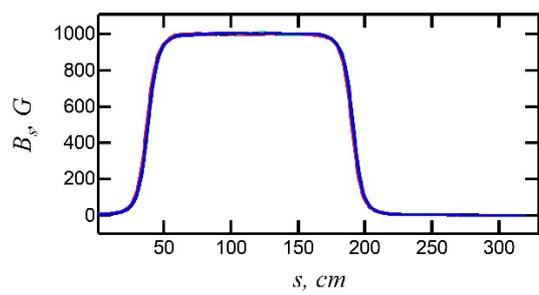
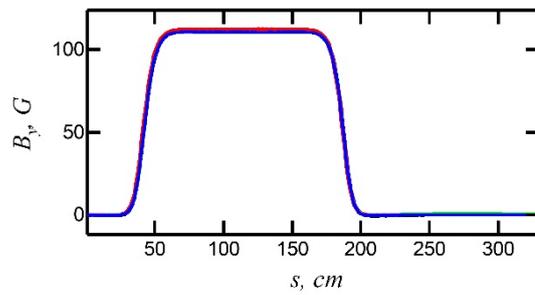


Рис. 4.



(a)

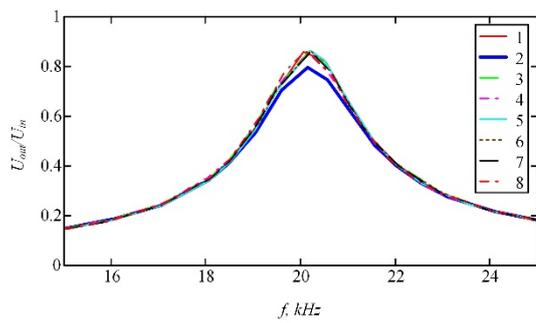


(б)

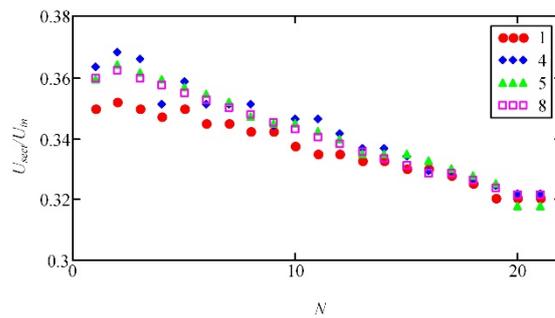
Рис. 5.



Рис. 6.

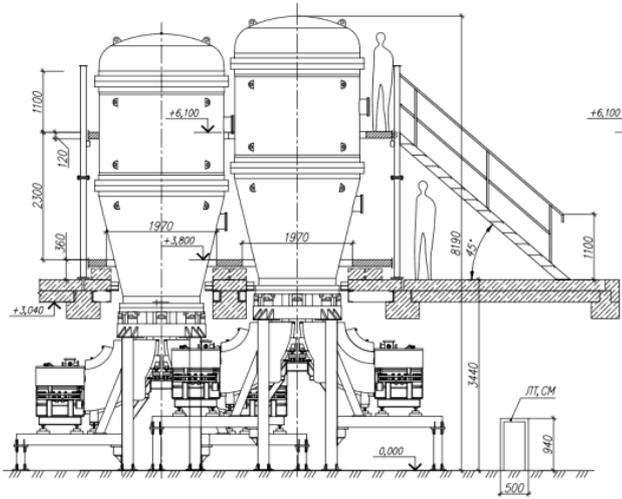


(a)



(б)

Рис. 7.



(a)



(б)

Рис. 8.



Рис. 9.

Для связи с авторами:

Брызгунов Максим Игоревич

E-mail: M.I.Bryzgunov@inp.nsk.su

Тел.: (383)329-40-35 (сл.)

~~Для переводчика:~~

~~M. I. Bryzgunov^{1,2}, A. V. Bublely¹, A. D. Goncharov¹, A. P. Denisov¹, V. I. Kremnev¹, V. V. Parkhomchuk¹, V. M. Panasyuk¹, A. V. Petrozhitskiy¹, V. B. Reva^{1,2}, N. S. Kremnev¹, S. V. Shiyankov¹, A. A. Putmakov¹, V. M. Konstantinov¹, P. E. Muratkoziev¹, V. G. Cheskidov¹, V. Ya. Korehagin¹, S. P. Pospelita¹, L. S. Pospelita¹, V. A. Polukhin¹, G. I. Erg¹, S. I. Ruvinskiy¹, O. V. Belikov¹, V. A. Chekavinskii¹, L. M. Sehegolev¹, D. N. Skorobogatov¹, I. A. Gusev¹, D. V. Senkov^{1,2}, D. N. Pureskin¹, K. M. Gorehakov^{1,2}, P. V. Vakhrushev¹, A. M. Batrakov¹, K. S. Shtro¹, A. V. Pavlenko¹, M. N. Kondaurov¹, G. V. Karpov¹, M. G. Fedotov^{1,2}, E. A. Bekhtenev¹, A. V. Ivanov¹, A. A. Zharikov¹~~

~~¹⁾ Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS, 11, Akademika Lavrentieva prospect, Novosibirsk, 630090 Russia~~

~~²⁾ Novosibirsk State University, 2 Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russia~~

~~Production and testing of elements of the high voltage electron cooling system for NICA collider~~

~~Budker INP continues to create a high voltage electron cooling system for the NICA collider, which is necessary to achieve the design luminosity of the complex in ion-ion collisions. The system consists of two independent coolers with an electron energy of up to 2.5 MeV with current of up to 1 A, which simultaneously cool two colliding ion beams. The article describes the status of the system and the results of testing of its elements.~~