

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК: 621.384.66+621.318+539.1.076

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КВАДРУПОЛЯ FFS¹

©2024 г. С. С. Козуб^{а,*}, Ю. В. Алтухов^а, И. В. Богданов^{а,**},
А. В. Двойченков^а, А. П. Лунев^а, А. А. Олюнин^а,
В. М. Смирнов^а, Л. М. Ткаченко^а, В. И. Шувалов^а

^а *Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино, Московская обл., пл. Науки, 1*

*e-mail: sergey.kozub@ihep.ru

**e-mail: bogdanov@ihep.ru

Поступила в редакцию 30.11.2023 г.

После доработки 30.04.2024 г.

Принята к публикации 04.06.2024 г.

Канал HED@FAIR ускорительного комплекса FAIR в Дармштадте (Германия) должен иметь фокусирующую систему (FFS), основными компонентами которой являются четыре сверхпроводящих (СП) квадрупольных магнита, обеспечивающие размер пучка около 1 мм. Эти магниты должны иметь уникальное сочетание внутреннего диаметра СП обмотки – 260 мм и градиента магнитного поля – 37.5 Тл/м. НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ разработал конструкцию квадрупольного магнита, технологию изготовления его СП обмотки и ее бандажирования, производства магнитопровода, их сборки в холодную массу квадрупольного магнита. Представлены результаты исследования частей холодной массы квадрупольного магнита FFS в процессе их изготовления и после сборки.

1. ВВЕДЕНИЕ

На создаваемом ускорительном комплексе ионов и антипротонов (FAIR, Германия) [1] планируются эксперименты по изучению фундаментальных свойств состояний с высокой плотностью энергии в веществе, генерируемых интенсивными пучками тяжелых ионов. Для этих экспериментов НИЦ “Курчатовский институт”–ИФВЭ создает четыре сверхпроводящих (СП) квадрупольных магнита для системы финальной фокусировки ионного пучка канала

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

HED@FAIR [2]. Эти магниты должны обладать уникальным сочетанием большого внутреннего диаметра сверхпроводящей обмотки 260 мм и высокого градиента магнитного поля 37.5 Тл/м, а также неоднородностью магнитного поля не более $1 \cdot 10^{-3}$. Для выполнения этих требований необходимо разработать конструкцию и технологию производства с высокой точностью СП обмотки, ее бандажа, магнитопровода, их сборки в холодную массу. В статье представлены результаты изготовления и испытания холодной массы первого квадруполья.

2. КОНСТРУКЦИЯ КВАДРУПОЛЯ

Оптимизация геометрии квадруполья FFS [3–5], а также расчеты бандажа и усилий предварительного сжатия обмотки бандажом [6] позволили определить размеры СП обмотки, бандажа и магнитопровода. Поперечное сечение квадруполья и его проектные параметры представлены на рис.1 и табл. 1. Сверхпроводящая обмотка квадруполья состоит из четырех двухслойных катушек. При вводе тока в обмотку возникают значительные поперечные силы, которые компенсируются бандажом, изготовленным из листов толщиной 1.6 мм нержавеющей стали ATI 219 (UNS S21904), обладающей высокой прочностью и низкой магнитной проницаемостью. Точность изготовления обмотки определяется точностью производства СП кабеля и бандажа, которые должны быть изготовлены с допуском на уровне десятков микрон, что при больших размерах бандажа является непростой задачей. Забандажированная обмотка (обмоточный блок) устанавливается в магнитопровод с зазором 0.2 мм.

Таблица 1. Проектные параметры квадруполья FFS

Параметр	Значение
Режим работы	Постоянный ток
Внутренний диаметр обмотки, мм	260
Длина обмотки, м	1.89
Эффективная длина обмотки, м	1.76
Градиент центрального поля, Тл/м	37.5
Номинальный ток, кА	5.73
Магнитное поле в обмотке, Тл	5.87
Критическая температура, К	5.8
Запасенная энергия, кДж	1079
Радиальная сила на октант (кН/м)	642
Азимутальная сила на октант (кН/м)	1211
Осевая сила, кН	480
Длина вакуумного сосуда, мм	2400
Вес холодной массы квадруполья, т	6.5
Общий вес квадруполья, т	10

Рис. 1. Поперечное сечение квадруполья FFS.

Обмоточный блок с магнитопроводом (холодная масса) помещается в гелиевый сосуд. Холодная масса охлаждается жидким гелием при температуре 4.5 К и давлении 3 бара. Гелиевый сосуд на титановых тросах подвешивается в вакуумном сосуде. Между вакуумным и гелиевым сосудами находится тепловой экран, охлаждаемый гелием при температуре 50 К и давлении 13 бар.

3. КОНСТРУКЦИЯ ОБМОТОЧНОГО БЛОКА КВАДРУПОЛЯ

Для изготовления обмотки квадрупольного блока использован композитный ниобий-титановый в медной матрице провод диаметром (0.85 ± 0.03) мм с критическим током (570 ± 50) А в поле 5 Тл при температуре 4.2 К.

Каждая из четырех двухслойных катушек квадрупольного блока изготавливалась одним куском плоского транспонированного кабеля, параметры которого представлены в табл. 2. Голый кабель (без изоляции) имел трапециевидное поперечное сечение с основаниями 1.437 и 1.594 мм и при давлении 100 МПа его средняя толщина по длине кабеля колебалась в пределах ± 6 мкм. При диаметре СП провода более 0.85 мм коэффициент упаковки кабеля превышал 0.87, качество кабеля ухудшалось, поэтому количество проволок в кабеле было уменьшено с 28 до 27. В этом случае расчетная величина критической температуры квадрупольного блока уменьшается на 0.04 К.

Таблица 2. Параметры СП кабеля для квадрупольного блока

Параметр	Величина			
	10	12	13	15
Номер катушки	10	12	13	15
Количество СП проводов	28	27	27	27
Диаметр (кол-во в кабеле) СП проводов, мм	0.86 (17) 0.87 (11)	0.86 (8) 0.87 (19)	0.865(17) 0.87 (10)	0.86 (12) 0.87 (7) 0.88 (8)
Угол/шаг транспонирования, градусы/мм	14/91	16/86	16/86	16/86
Плотность упаковки	0.887	0.868	0.868	0.87
Ширина голого кабеля, мм	12.49 - 0.06	12.52 - 0.08	12.49 - 0.04	12.52 - 0.08
Ширина кабеля в изоляции, мм	12.81 - 0.02	12.78 - 0.04	12.76 - 0.02	12.76 - 0.04
Средняя толщина голого кабеля при давлении 100МПа, мм	1.508 ± 0.003	1.507 ± 0.005	1.509 ± 0.003	1.513 ± 0.006
Средняя толщина кабеля в изоляции при давлении 100МПа, мм	1.699 ± 0.005	1.707 ± 0.004	1.705 ± 0.005	1.696 ± 0.010

Изоляция кабеля состояла из трех слоев полиимидной пленки толщиной 25 мкм и слоя стеклоленты толщиной примерно 70 мкм, пропитанной эпоксидным компаундом. Спекание катушек производилось при температуре 150°C и давлении 100 МПа. Для изготовления внутреннего слоя катушки использовалось 140 м кабеля. Этот слой состоял из двух блоков 27+11 витков, разделенных латунной проставкой для получения необходимого

качества поля. На наружный слой, состоящий из 47 витков, потребовалось 180 м кабеля. Проставка из стеклотекстолита G10 толщиной 0.5 мм находилась между внутренним и наружным слоями.

Выбор катушек для обмотки квадруполь осуществлялся по результатам измерения отклонения их азимутального размера от размера калибра при давлении 100 МПа, которое не превышало 200 мкм (табл. 3). Измерения зависимости деформации катушек в азимутальном направлении от усилия сжатия (рис.2) были использованы для расчета модуля упругости СП катушек (рис.3), который необходим для расчета давления сжатия СП обмотки бандажом в азимутальном направлении (престресса) при сборке обмоточного блока.

Таблица 3. Результаты измерений СП катушек квадруполь

Параметр	Величина			
	10	12	13	15
Номер катушки				
Внутренний слой:				
Полная длина, мм	1905	1904	1905	1904
Длина прямой части, мм	1740	1739	1740	1739
Отклонение азимутального размера от калибра при давлении 100 МПа:				
в середине слева, мкм	195	-12	25	22
в середине справа, мкм	12	-90	-89	-106
Внешний слой:				
Полная длина, мм	1910	1909	1908	1910
Длина прямой части, мм	1678	1677	1676	1678
Отклонение азимутального размера от калибра при давлении 100 МПа:				
в середине слева, мкм	48	55	-5	-180
в середине справа, мкм	39	10	33	20
Сопротивление катушки при $T=22^{\circ}\text{C}$, Ом	0.6054	0.6303	0.6275	0.6186
Индуктивность, мГн	9.07	9.05	9.05	9.03

Рис. 2. Отклонение азимутального размера СП катушки от калибра при различном давлении в цикле нагружение–разгружение.

Рис. 3. Результаты расчета модуля упругости СП катушки в азимутальном направлении при различном давлении в цикле нагружение–разгружение.

Результаты расчета [6] показали, если после сжатия прессом обмоточного блока престресс в обмотке составит во внутреннем и в наружном слое 100 МПа, то после снятия прессовой нагрузки падение престресса составит 5 МПа во внутреннем слое и 10 МПа в наружном слое. В течение нескольких лет ползучесть образца обмотки составила 0.1% [7], что соответствует падению престресса 16 МПа. Расчеты установили, что после охлаждения до 4.5 К престресс уменьшится на 20 МПа во внутреннем слое и 16 МПа в наружном слое, а после введения тока до 5.73 кА падение престресса для первого витка от полюса (где

максимальное магнитное поле) составит 30 МПа для внутреннего слоя и 28 МПа для наружного слоя. Таким образом, при номинальном токе 5.73 кА усилие сжатия составит 29 МПа в внутреннем слое и 30 МПа в наружном слое обмотки, что обеспечит ее механическую стабильность.

Точность изготовления СП обмотки, особенно в азимутальном направлении, сильно влияет на магнитные характеристики квадруполья. Эта точность существенно зависит от точности изготовления бандажа, в первую очередь его внутренних размеров, поэтому допуски на эти размеры составляли несколько десятков микрон. Обеспечение таких допусков при наружном диаметре бандажа 386 мм достаточно сложная задача.

Для обеспечения нужной точности пластины бандажа изготавливались электроэрозионным способом. Непростой задачей оказался контроль размеров бандажа. Хотя заявленная точность измерительных машин составляла 1 мкм, они давали значительный разброс результатов измерений, особенно симметричных размеров. Поэтому была разработана методика и изготовлено приспособление, позволившие провести необходимые измерения, скорректировать процесс изготовления и обеспечить заданные допуски размеров пластин бандажа.

Четыре катушки собирались в обмотку на специально разработанной разжимной оправке, на которой бандажирование обмотки осуществлялось в горизонтальном положении. Пара воротников бандажа устанавливалась на обмотке в горизонтальном, затем в вертикальном положении и так поочередно на участке длиной 65 мм. Сжатие обмотки воротниками осуществлялось участками длиной 65 мм четырьмя гидроцилиндрами с усилием 27 т на каждом из них, чтобы обеспечить престресс в СП обмотке 100 МПа. Фиксация воротников в сжатом состоянии осуществлялась шпонками из нержавеющей стали 1.4435.

В связи с трудностью изготовления штамповкой пластин магнитопровода большого размера из листов стали 2081 толщиной 2 мм он был собран из пластин стали 20 толщиной 22 мм, изготовленных механической обработкой. Сборка магнитопровода осуществлялась в прессе с усилием сжатия 20 т, что обеспечило заданный коэффициент его упаковки 0.98. На рис.4 показаны результаты измерения зависимости магнитной проницаемости сталей 2081 и 20 от магнитного поля при температуре 77 К. Проведенный по результатам измерений расчет показал, что замена стали 2081 на сталь 20 практически не повлияла на характеристики квадруполья.

Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости сталей 2081 и 20 от магнитного поля при температуре 77 К.

В процессе изготовления СП катушек, обмоточного блока, магнитопровода, сборки холодной массы в обечайку гелиевого сосуда контролировались их геометрические размеры, отсутствие электрических замыканий между витками обмотки и обмотки на корпус. Результаты измерений подтвердили получение заданных параметров магнита.

На рис.5 показан внешний вид СП обмоточного блока квадруполь FFS с магнитопроводом, размещенных внутри обечайки гелиевого сосуда.

Рис. 5. СП обмоточный блок с магнитопроводом в обечайке гелиевого сосуда квадруполь FFS.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны конструкция и технология изготовления квадруполь FFS с уникальным сочетанием внутреннего диаметра сверхпроводящей обмотки –260 мм и высокого градиента магнитного поля – 37.5 Тл/м. Изготовление и сборка СП обмотки и бандажа выполнено с заданной точностью для обеспечения проектных магнитных характеристик квадруполь. Сборка и бандажирование СП обмотки магнита осуществлены по созданной оригинальной технологии с учетом результатов расчета напряженно-деформированного состояния обмоточного блока СП квадруполь. Обмотка установлена в магнитопровод, изготовленный с высоким коэффициентом упаковки 0.98, и собрана в обечайку гелиевого сосуда. На всех этапах сборки квадруполь FFS проводились измерения его параметров, подтвердивших проектные характеристики магнита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stocker H., Sturm C.* // Nucl. Phys. 2011. V. A855. P. 506. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2011.02.117>
2. *Gutbrod H.H., Gross K.D., Henning W.F., Metag V.* An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons. Conceptual design report. GSI, 2001. <https://inspirehep.net/literature/567994>
3. *Tkachenko L., Ageev A., Altuhov Y., Bogdanov I., Kashtanov E., Kozub S., Varentsov D., Zinchenko S.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2019. V. 941. P. 162323. <http://doi.org/10.1016/j.nima.2019.06.064>
4. *Агеев А.И., Алтухов Ю.В., Богданов И.В., Каштанов Е.М., Козуб С.С., Слабодчиков П.И., Ткаченко Л.М.* // Вопросы Атомной Науки и Техники, Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 4 (105). С. 28.
5. *Tkachenko L., Altuhov Y., Bogdanov I., Kozub S.* // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2022. V. 32. № 4. P. 4000105. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3141979>

6. *Altukhov Y., Ageev A., Bogdanov I., Kozub S., Ryabova T., Tkachenko L., Riabchikova A. // Proc. of “RuPAC’21” Conf., Alushta, 2021. P. 156.
<http://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA13>*
7. *Kozub S., Zubko V. // Proc. of Inter. Conf. on Magn. Technol. MT-15. 1997. Beijing, China. V. 2. P. 1186.*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Поперечное сечение квадруполья FFS.

Рис. 2. Отклонение азимутального размера СП катушки от калибра при различном давлении в цикле нагружение–разгружение.

Рис. 3. Результаты расчета модуля упругости СП катушки в азимутальном направлении при различном давлении в цикле нагружение–разгружение.

Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости сталей 2081 и 20 от магнитного поля при температуре 77 К.

Рис. 5. СП обмоточный блок с магнитопроводом в обечайке гелиевого сосуда квадруполья FFS.

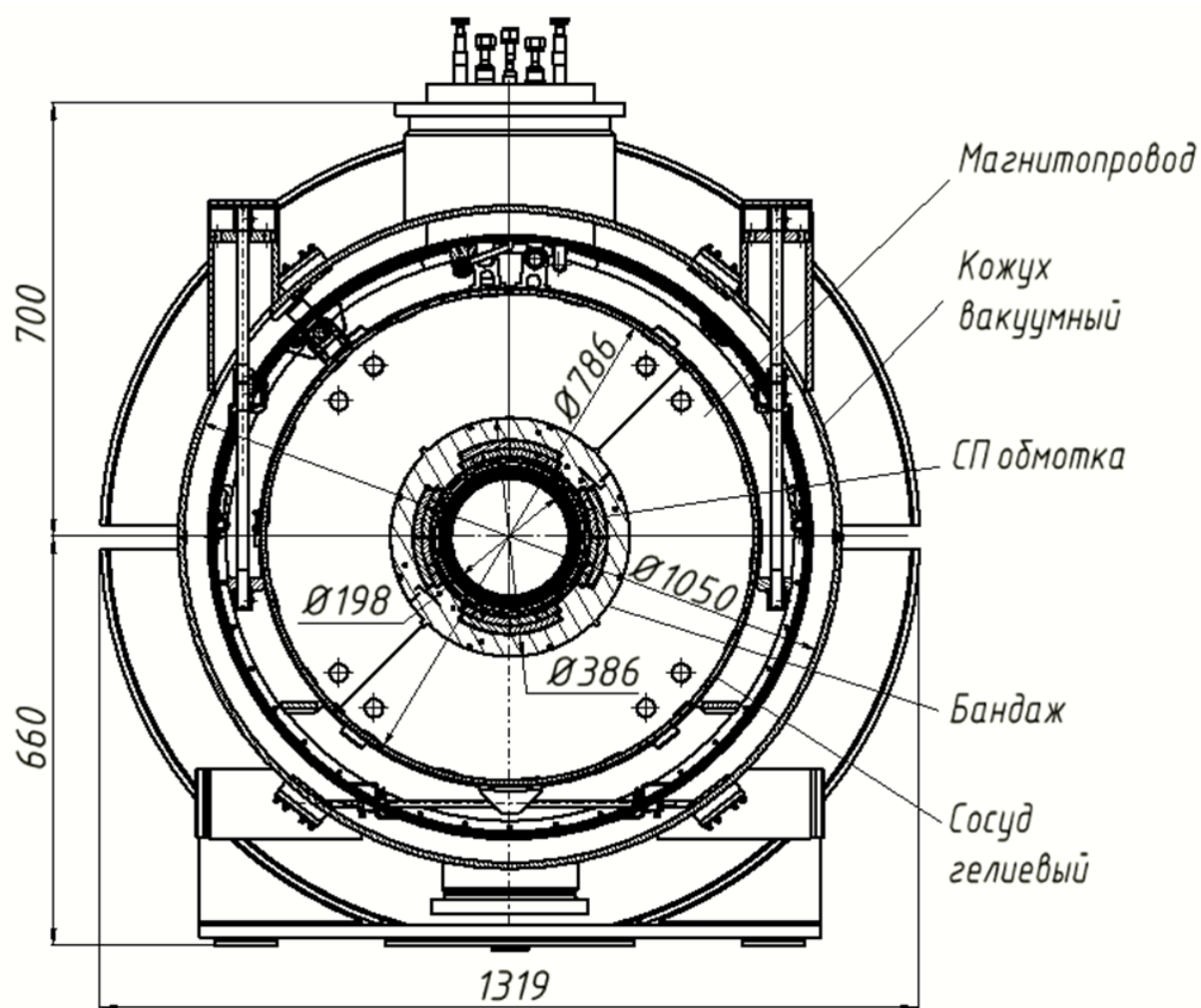


Рис. 1.

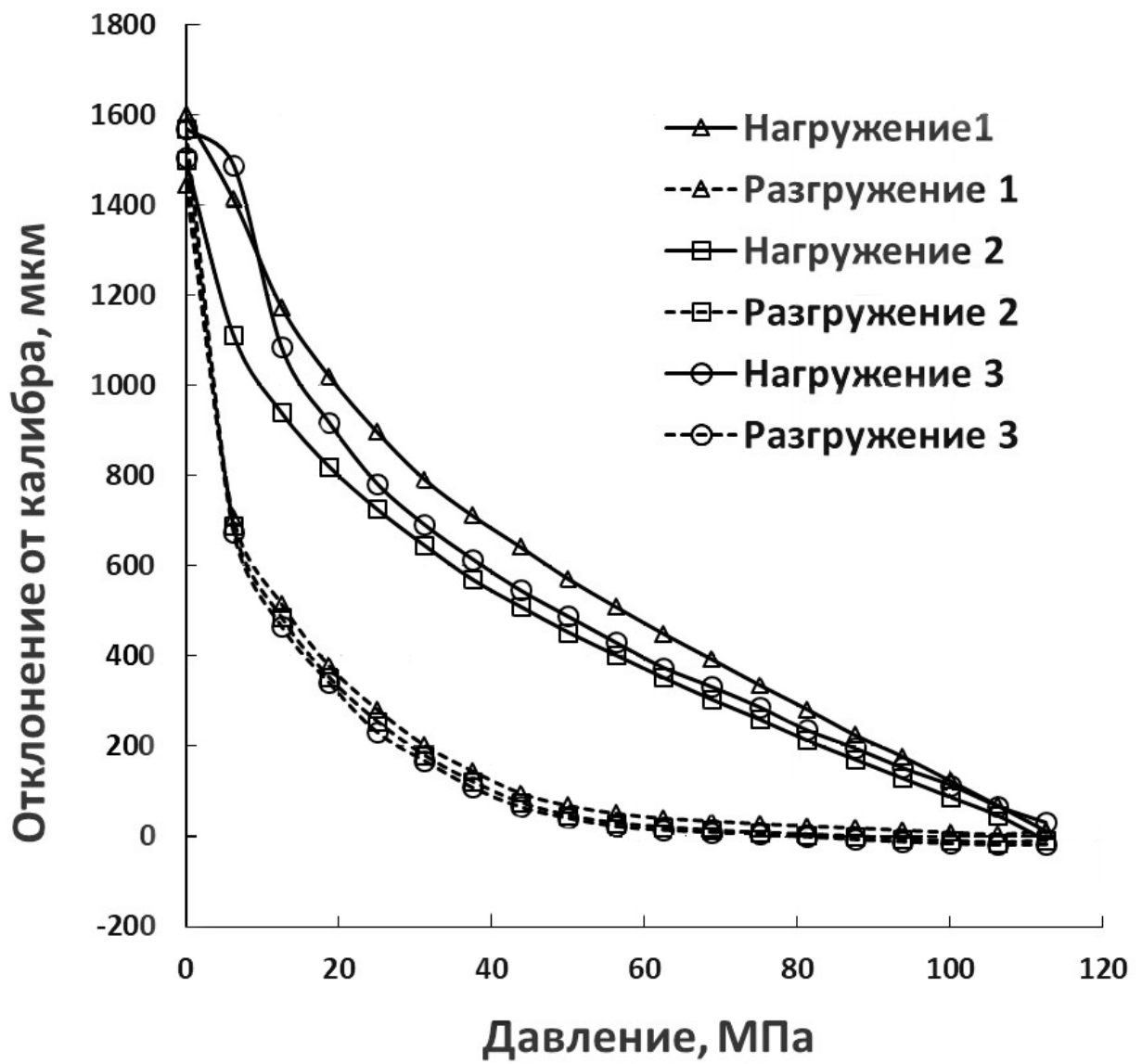


Рис. 2.

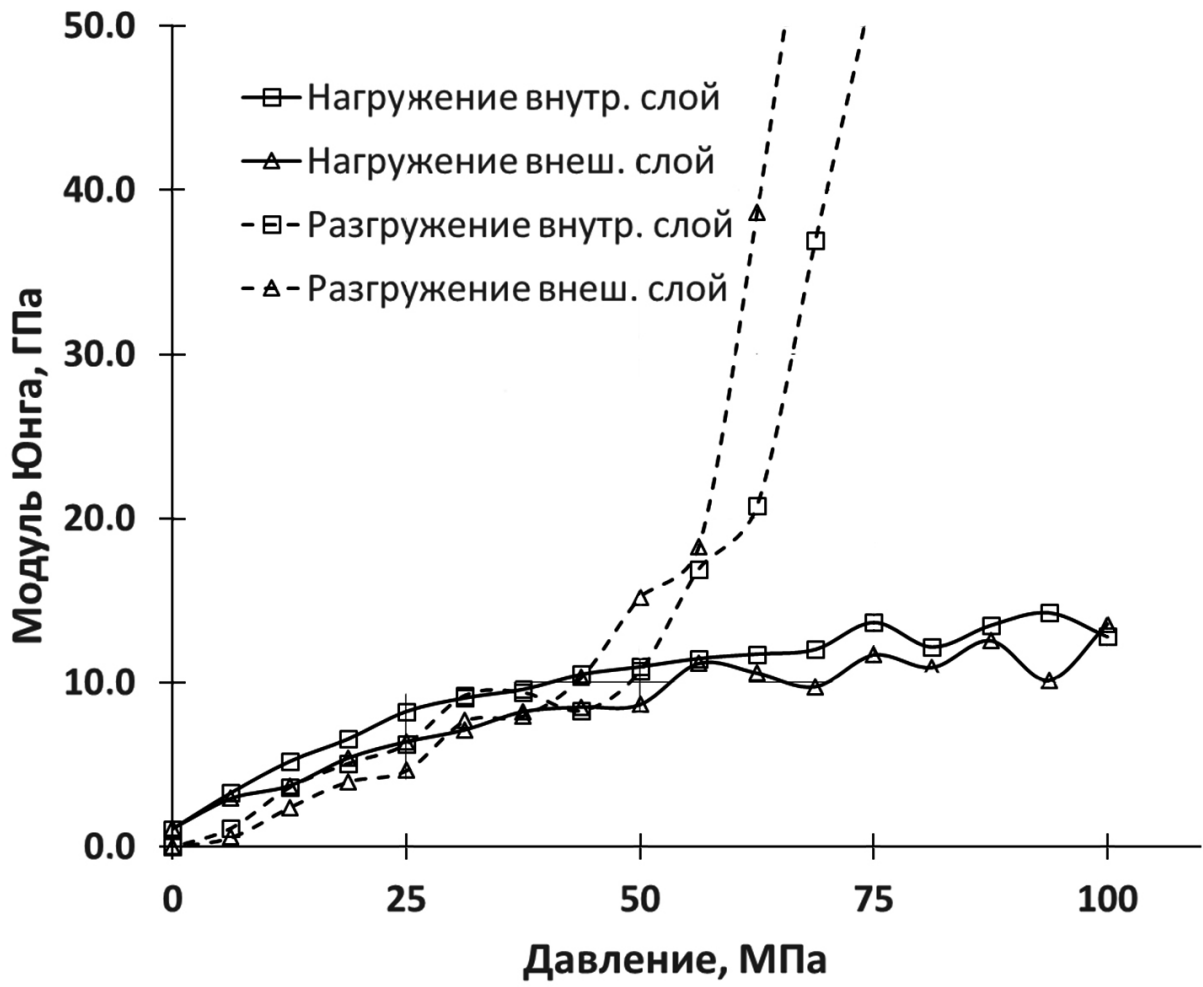


Рис. 3.

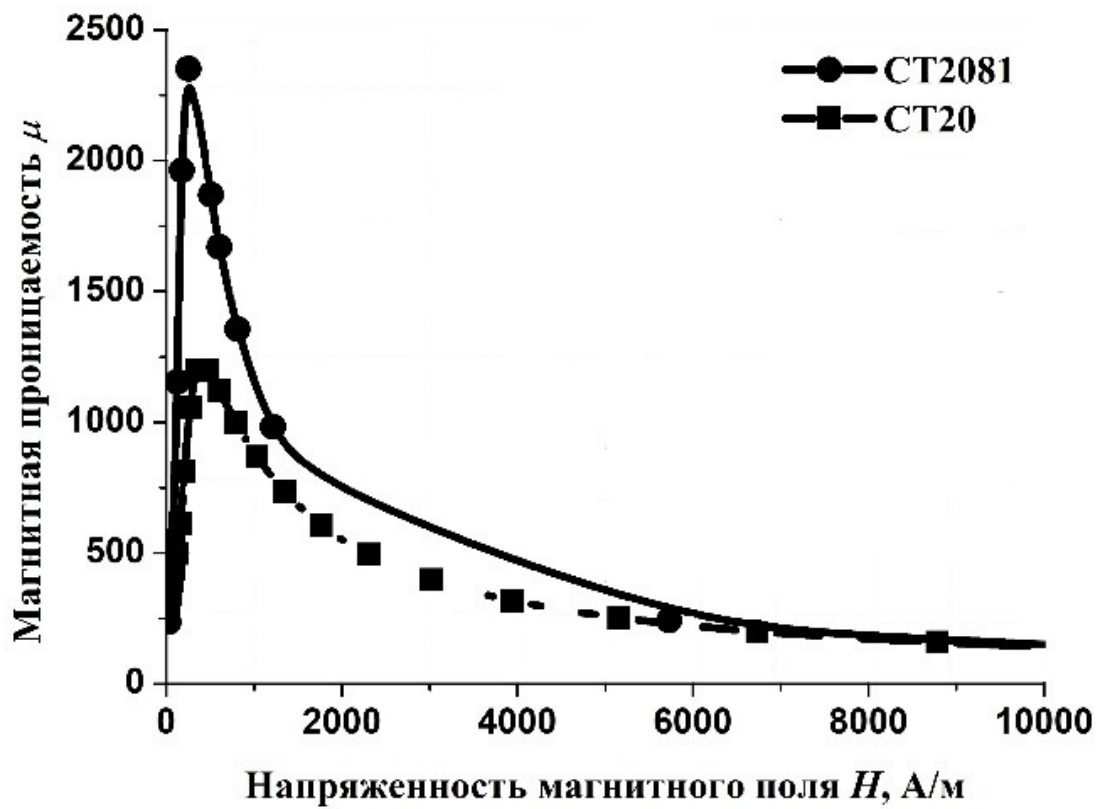


Рис. 4.

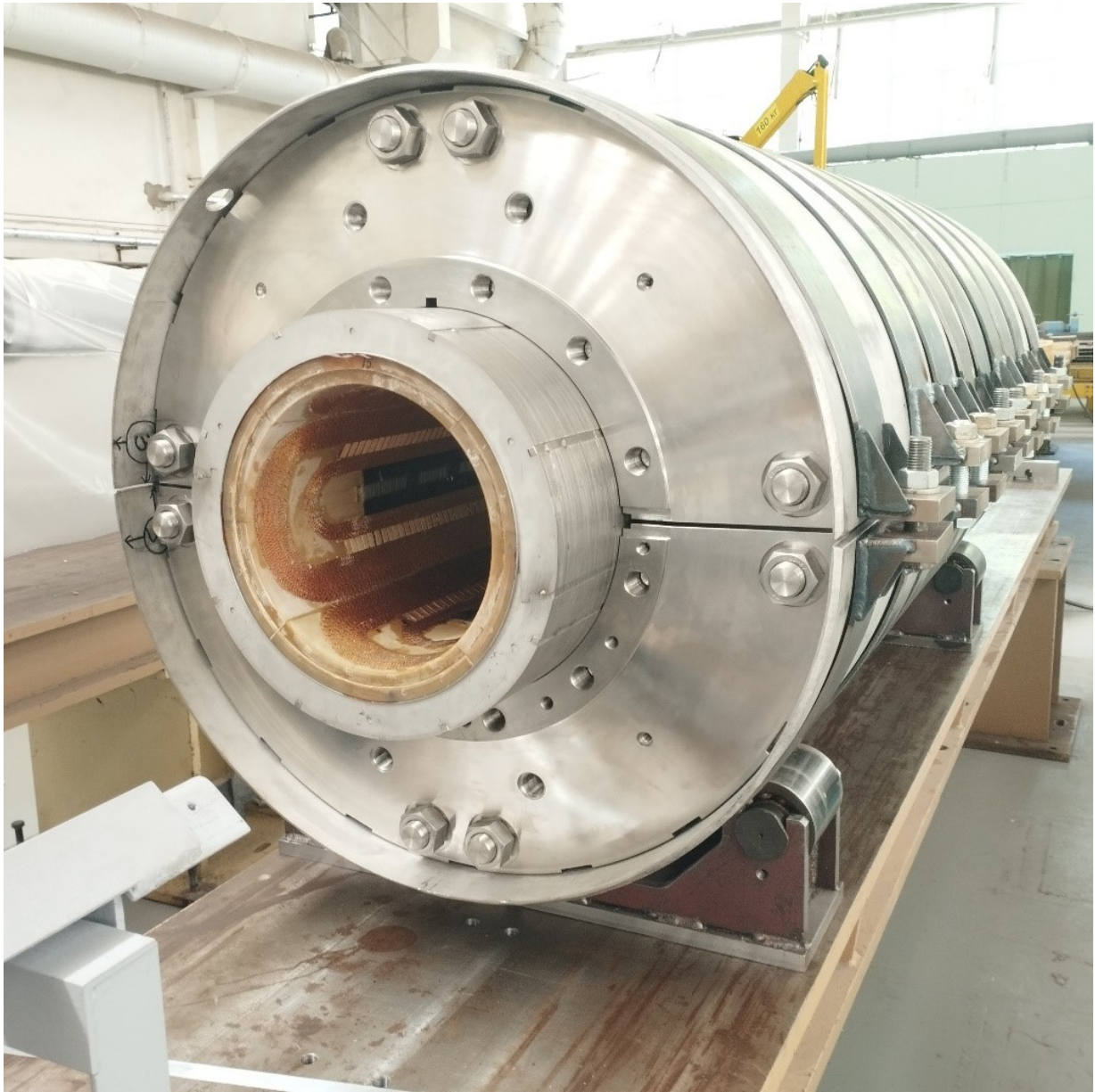


Рис. 5.

Для связи с авторами:

Богданов Игорь

E-mail: bogdanov@ihep.ru

(4967)713387

Козуб Сергей

E-mail: kozub@ihep.ru

E-mail: sergey.kozub@ihep.ru

(4967)713181

Алтухов Юрий

E-mail: yuriu.altukhov@ihep.ru

Шувалов Виктор

E-mail: victor.shuvalov@ihep.ru

Для переводчика:

Manufacture of FFS Superconducting Quadrupole

S. S. Kozub*, Y. V. Altukhov, I. V. Bogdanov, A. V. Dvoichenkov, A. P. Lunev, A. A. Olyunin, V. M. Smirnov, L. M. Tkachenko, V. I. Shuvalov

NRC "Kurchatov Institute" – IHEP, Protvino, Moscow region, 142281

*e-mail: sergey.kozub@ihep.ru

Abstract - The HED @ FAIR channel of the FAIR accelerator complex in Darmstadt, Germany, should have a focusing system (FFS), the main components of which are four superconducting (SC) quadrupole magnets providing a beam size of about 1 mm. These magnets should have a unique combination of the internal diameter of the SC winding 260 mm and the magnetic field gradient 37.5 T/m. National Research Center "Kurchatov Institute" - IHEP has developed the design of a quadrupole, the technology of manufacturing of SC winding and its collaring, the production of a magnetic core and their assembly into a quadrupole cold mass. The results of the study of parts of the cold mass of the FFS quadrupole during their manufacture and after assembly are presented in this article.