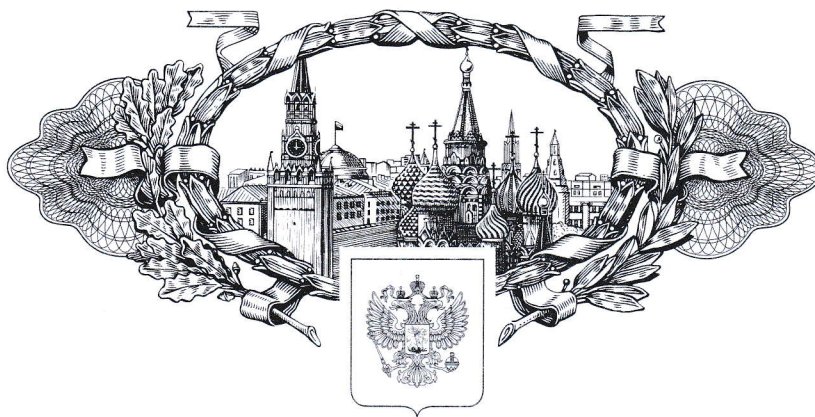


# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2557090

### СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД С ГОФРИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

Патентообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (ИЯФ СО РАН) (RU)**

Автор(ы): **см. на обороте**

Заявка № 2013120435

Приоритет изобретения **30 апреля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **23 июня 2015 г.**

Срок действия патента истекает **30 апреля 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



30.04



Автор(ы): **Яровой Вадим Александрович (RU), Синецкий  
Станислав Леонидович (RU), Иванцовский Максим  
Владимирович (RU), Шошин Андрей Алексеевич (RU),  
Бурдаков Александр Владимирович (RU), Брагин Алексей  
Владимирович (RU)**

ПО ИНТ

(12)ф

(21)с

(24)д

Прв

(22)д

(43)д

(45)д

(56)д

Ад

(54)д

УД

ПД

ПО

ИС

НБ

ОБ

НБ

Ф

П

Н

М



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21)(22) Заявка: 2013120435/07, 30.04.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.04.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.04.2013

(43) Дата публикации заявки: 10.11.2014 Бюл. № 31

(45) Опубликовано: 20.07.2015 Бюл. № 20

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Н.Г.Анищенко и др. Сверхпроводящий магнит с высокой однородностью магнитного поля для подвижной поляризованной мишени // Краткие сообщения ОИЯИ N6[92]-98, стр.49-54. Н.Г.Анищенко и др. Сверхпроводящая магнитная система с криокулером для источника ионов DECRIS-SC // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т.3., N1(130). С.45-62. SU 1508288 A1, 15.09.1989. SU 1032482 (см. прод.)

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, пр. Академика  
Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН, ОНИО

(72) Автор(ы):

Яровой Вадим Александрович (RU),  
Синицкий Станислав Леонидович (RU),  
Иванцовский Максим Владимирович (RU),  
Шошин Андрей Алексеевич (RU),  
Бурдаков Александр Владимирович (RU),  
Брагин Алексей Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН  
(ИЯФ СО РАН) (RU)

(54) СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД С ГОФРИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ  
УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

### (57) Формула изобретения

1. Сверхпроводящий соленоид с гофрированным магнитным полем для удержания плазмы, выполненный из NbTi провода, пропитанного эпоксидным компаундом, и помещенный в горизонтальный криостат, причем внутренний диаметр кожуха соленоида используется как стенка вакуумной камеры, отличающийся тем, что он состоит из двух независимых и имеющих раздельные токовводы магнитных обмоток, причем внешняя обмотка намотана последовательно.

2. Сверхпроводящий соленоид по п. 1, отличающийся тем, что в конструкции наружной цилиндрической оболочки сделаны крепления для монтажа съемных торцевых фланцев для установки последовательно нескольких идентичных соленоидов.

3. Сверхпроводящий соленоид по п. 1, отличающийся тем, что в его конструкции предусмотрены силовые элементы, обеспечивающие удержание соленоида в продольном направлении при возникновении больших усилий, например, до 15 тонн, вдоль оси магнитного поля возникающих вследствие взаимного притяжения/отталкивания

соседних соленоидов.

4. Сверхпроводящий соленоид по п. 1, отличающийся тем, что внутренняя стенка кожуха соленоида, она же стенка вакуумной камеры для проведения эксперимента, оснащена водяным охлаждением.

(56) (продолжение):

A, 23.08.1988. RU 2143753 C1, 27.12.1999. SU 1202427 A, 07.08.1987. FR 2681228 A1, 28.05.1993

R U 2 5 5 7 0 9 0 C 2





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013120435/07, 30.04.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.04.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.04.2013

(43) Дата публикации заявки: 10.11.2014 Бюл. № 31

(45) Опубликовано: 20.07.2015 Бюл. № 20

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Н.Г.Анищенко и др. Сверхпроводящий магнит с высокой однородностью магнитного поля для подвижной поляризованной мишени // Краткие сообщения ОИЯИ N6[92]-98, стр.49-54. Н.Г.Анищенко и др. Сверхпроводящая магнитная система с криокулером для источника ионов DECRIS-SC // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т.3., N1(130). С.45-62. SU 1508288 A1, 15.09.1989. SU 1032482 (см. прод.)

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, пр. Академика  
Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН, ОНПО

(72) Автор(ы):

Яровой Вадим Александрович (RU),  
Синицкий Станислав Леонидович (RU),  
Иванцовский Максим Владимирович (RU),  
Шошин Андрей Алексеевич (RU),  
Бурдаков Александр Владимирович (RU),  
Брагин Алексей Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

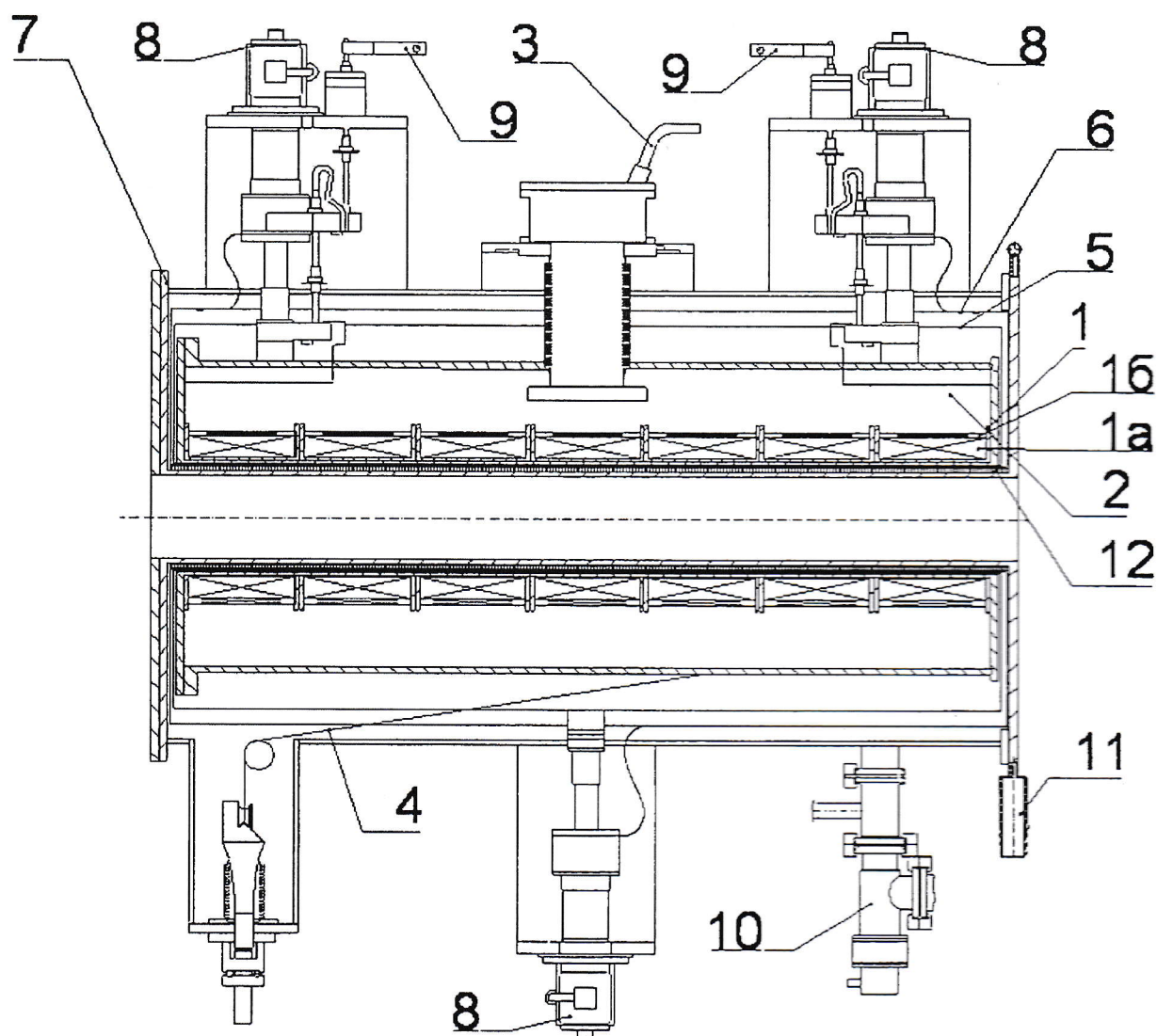
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН  
(ИЯФ СО РАН) (RU)

## (54) СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД С ГОФРИРОВАННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ

(57) Реферат:

Изобретение относится к физике плазмы. Технический результат состоит в повышении надежности. Сверхпроводящий соленоид с гофрированным магнитным полем позволяет получить в области пространства длиной 1,6 м и диаметром 0,16 м постоянное по времени аксиально-симметричное магнитное поле с периодом гофрировки 0,43 м с максимальным и минимальным значениями поля на оси соленоида 7,3 Тл и 4 Тл, соответственно. Изменением токов в обмотках соленоида пробочное отношение можно изменять в пределах  $R=1\div 1,8$ . В его конструкции предусмотрена возможность

установки последовательно нескольких идентичных соленоидов, для создания протяженного магнитного поля гофрированной конфигурации, например, три секции, установленных последовательно, создадут гофрированное магнитное поле протяженностью ~5 м. Поскольку соленоид предназначен для проведения экспериментов с высокотемпературной термоядерной плазмой, в его конструкции предусмотрена необходимая защита от теплового воздействия излучения плазмы на сверхпроводящую часть соленоида. 3 з.п. ф-лы, 1 ил.



(56) (продолжение):

A, 23.08.1988. RU 2143753 C1, 27.12.1999. SU 1202427 A, 07.08.1987. FR 2681228 A1, 28.05.1993



Область техники

Физика плазмы, управляемый термоядерный синтез, удержание плазмы магнитным полем

Уровень техники

5 В качестве аналога изобретения можно привести сверхпроводящий поляризующий магнит для подвижной поляризованной мишени, изготовленный в Дубне [1]. Основной частью данной установки является горизонтальный сверхпроводящий соленоид. Его обмотки выполнены из NbTi провода, пропитаны эпоксидным компаундом и помещены в горизонтальный криостат, что полностью соответствует предлагаемой компоновке  
10 изобретения. Внутренний диаметр кожуха соленоида используется как стенка вакуумной камеры, в которой проводится эксперимент, что также соответствует нашей задаче.

Однако, в отличие от предлагаемой нами конструкции, данный соленоид создает однородное магнитное поле посредством основной катушки с компенсацией кривизны линий магнитного поля на краях при помощи независимых вспомогательных секций.  
15 Такая конструкция не может быть использована для создания гофрированного магнитного поля. Вторым важным аспектом - это отсутствие в данной конструкции силовых элементов, обеспечивающих удержание соленоида в продольном направлении при возникновении больших усилий вдоль оси магнитного поля. Такие нагрузки будут возникать при последовательной установке соленоидов, один за другим, вследствие  
20 взаимного притяжения/отталкивания соседних соленоидов.

Внутренняя стенка кожуха соленоида, она же стенка вакуумной камеры для проведения эксперимента, не оснащена никаким механизмом теплосъема, что может привести к недопустимому нагреву соленоида и выходу его из режима сверхпроводимости, в результате прогрева стенки излучением от плазмы.  
25 Другим аналогом может служить сверхпроводящая магнитная система для источника ионов DECRIS-SC [2]. Особенности данной системы являются наличие криокулера для криостатирования магнита и возможность создания специальной (неоднородной) конфигурации магнитного поля. Данная система наиболее приближена к предложенной нами схеме соленоида, т.к. имеет возможность создавать гофрированную конфигурацию  
30 магнитного поля и позволяет варьировать пробочное отношение при помощи изменения величины токов в независимых обмотках. В дополнение к этому в данной схеме используется криокулер для криостатирования объема соленоида, что совпадает с нашей схемой соленоида.

Однако в данной схеме существует ряд недостатков, не позволяющих их использовать  
35 для создания продолжительной ловушки плазмы, т.е. системы, в которой данные соленоиды будут установлены последовательно друг за другом. Во-первых, эта система на содержит силовых элементов, препятствующих нагрузкам вдоль оси соленоида, возникающих вследствие взаимного притяжения/отталкивания соседних соленоидов. Во-вторых, при таком соединении данных соленоидов на стыке соленоидов будут  
40 возникать провалы магнитного поля недопустимой величины. В-третьих, нет возможности пересмотреть конструкцию для увеличения числа катушек в соленоиде для увеличения числа пробок на протяжении его длины.

Литература:

1. Н.Г. Анищенко и др. Сверхпроводящий магнит с высокой однородностью  
45 магнитного поля для подвижной поляризованной мишени // Краткие сообщения ОИЯИ №6[92]-98, стр.49-54.

2. Н.Г. Анищенко и др. Сверхпроводящая магнитная система с криокулером для источника ионов DECRIS-SC // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т.3, №1(130). С.45-62.



## Раскрытие изобретения

1.1 Сверхпроводящий соленоид с гофрированным магнитным полем позволяет получить в области пространства длиной 1,6 м и диаметром 0,16 м постоянное по времени аксиально-симметричное магнитное поле с периодом гофрировки 0,43 м с максимальным и минимальным значениями поля на оси соленоида 7,3 Тл и 4 Тл, соответственно. Изменением токов в обмотках соленоида пробочное отношение можно изменять в пределах  $R=1\div 1,8$ .

1.2 Данный соленоид предназначен для удержания высокотемпературной плазмы в термоядерной установке ГДМЛ (газодинамическая многопробочная ловушка).

Сверхпроводящие обмотки соленоида позволяют создавать гофрированное магнитное поле большой величины (7,3 Тл) и поддерживать его в течение длительного времени от 1 час до нескольких месяцев. Данные параметры принципиальны и крайне важны для удержания термоядерной плазмы. Большое магнитное поле ловушки, направленное вдоль границы плазмы, должно существенно подавить потери плазмы поперек магнитного поля. Наличие гофрировки и большое пробочное отношение позволяют уменьшить потери вдоль магнитного поля и существенно увеличить время жизни плазмы. Возможность создания постоянного, а не импульсного поля, открывает перспективу проведения экспериментов в режиме с длительным удержанием термоядерной плазмы, в котором подпитка плазмы для компенсации ее потерь возможна с помощью расположенного на торце плазменного источника. Кроме того, конструкция данного соленоида допускает возможность плавного изменения степени гофрировки магнитного поля путем изменения соотношения токов в двух независимых обмотках магнитных катушек, из которых состоит соленоид.

## 2. Признаки, используемые для характеристики устройства

Целиком устройство имеет цилиндрическую форму и состоит из (см. приложение):

1. Катушка магнитного поля. Семь таких катушек, образующих секцию соленоида, расположены соосно одна за другой внутри заливной гелиевой камеры. Каждая магнитная катушка состоит из двух отдельных обмоток, намотанных одна поверх другой и закрепленных банджом из нержавеющей проволоки. Обмотки одного типа соединены последовательно внутри секции соленоида и могут запитываться независимо от различных источников питания. Внутренняя обмотка имеет 34 слоя по 209 витков, а наружная - 12 слоев с таким же количеством витков. Обмотка выполнена сверхпроводящим кабелем диаметром 0,91 мм на основе NbTi сплава с отношением NbTi/Cu - 1/1,42. Сверхпроводящий кабель намотан на изолированную стеклолентой толстостенную медную обечайку и пропитан под давлением эпоксидной смолой с наполнителем для выравнивания КТР. Две цепи последовательно соединенных наружных и внутренних обмоток магнитных катушек имеют отдельные тоководы, что позволяет варьировать соотношение токов в них, тем самым плавно перестраивая конфигурацию магнитного поля соленоида от квазиоднородной с  $R\approx 1$  до гофрированной с  $R\approx 1,8$ . Данная опция существенно увеличивает гибкость соленоида в подборе необходимой конфигурации магнитного поля, обеспечивающей эффективное удержание плазмы.

2. Гелиевая камера. Она представляет собой сваренный из листовой нержавеющей стали цилиндрический вакуумный объем диаметром 0,6 м и длиной 1,5 м с толщиной стенок 12 мм, оканчивающийся прочными торцевыми фланцами толщиной 15 мм. Кроме того прочность камеры усиливают ребра жесткости, расположенные в местах стыка цилиндрической поверхности с фланцами. Высокие требования к прочности конструкции гелиевой камеры обусловлены тем, что она, во-первых, воспринимает нагрузку



величиной около 25 тонн со стороны магнитных катушек при взаимодействии двух соседних секций соленоида, а, во-вторых, она должна удерживать давление испаренного жидкого гелия, возникающее при выделении части магнитной энергии внутри гелиевой камеры при срыве сверхпроводимости соленоида. В гелиевой камере предусмотрена специальная горловина для заливки жидкого гелия, предназначенного для охлаждения катушек магнитного поля и перевода их в сверхпроводящее состояние. Гелиевая камера подвешена на растяжках из прочных кевларовых тросов, которые удерживают ее в центральном положении относительно внешнего кожуха и не дают смещаться больше чем на 1 -2 мм при воздействии магнитным полем соседней секции соленоида. Каждая растяжка имеет регулировку натяжения с переходом из атмосферы в вакуум, которая необходима для центровки гелиевой камеры и выборки слабины троса. Крепление растяжек на камере осуществлено таким образом, чтобы изменение линейных размеров гелиевой камеры при захолаживании до 4К и нагреве до комнатной температуры не меняло натяжение растяжек.

Вторая функция данных растяжек - обеспечение компенсации сил, направленных вдоль оси соленоида, при установке нескольких соленоидов последовательно друг за другом.

3. Тепловые экраны. Поскольку внешний кожух находится при комнатной температуре, а гелиевая камера - при температуре жидкого гелия, то необходимо подавить потоки тепла за счет инфракрасного излучения стенок кожуха, а также теплопроводности по растяжкам с внешнего кожуха на гелиевую камеру. Для этой цели в конструкции предусмотрены два вложенных друг в друга тепловых экрана, которые поддерживаются криокулерами при температурах 20°К и 60°К. Каждый из экранов представляет собой тонкостенную (3 мм) замкнутую оболочку, образованную внешним и внутренним цилиндрами, соединенными торцевыми фланцами. Оболочки экранов изготовлены из медных листов и имеют разрез вдоль оси цилиндра по всей образующей для предотвращения появления азимутальных токов Фуко во время подъема и снижения магнитного поля в соленоиде. Для придания механической прочности края разреза скрепляются с помощью диэлектрической вставки, которая крепится к краям экрана посредством заклепок. Экраны монтируются на гелиевой камере с помощью диэлектрических шпильков, задающих величину зазоров между экранами и камерой. Растяжки из кевлара проходят сквозь экраны в специальных отверстиях, а теплоприток по ним за счет теплопроводности с наружного кожуха снимается на экраны с помощью медных канатиков.

4. Внешний кожух. Этот кожух представляет собой тороид прямоугольного сечения, состоящий из наружной и внутренней цилиндрических поверхностей и замыкающих их торцевых фланцев. Наружная цилиндрическая оболочка кожуха изготовлена из листовой нержавеющей стали и имеет толщину 8 мм. По краям к ней приварены утолщения для монтажа съемных торцевых фланцев. Один из фланцев сварен с внутренней цилиндрической оболочкой, имеющей диаметр 0,16 м, которая соединяется с противоположным фланцем посредством вакуумного уплотнения. Внешний кожух в процессе эксплуатации выполняет три функции. Во-первых, он является основой всей конструкции сверхпроводящего соленоида: на нем установлены системы подвески и натяжения растяжек, прочно удерживающих внутренние тепловые экраны и гелиевую камеру по центру системы. Помимо этого он соединяется с соседними секциями соленоида через торцевые фланцы, и, наконец, он своим весом опирается на передвижную опорную тележку, катающуюся по двум рельсам. Вторая функция кожуха - обеспечить вакуумные условия внутри своего объема для уменьшения теплопритока



к экранам и гелиевой камере. В-третьих, внутренний цилиндр кожуха сам является вакуумной камерой, внутри которой планируется создавать и удерживать термоядерную плазму. Так как в процессе эксплуатации внутренний цилиндр будет подвержен большим тепловым нагрузкам под воздействием потоков частиц и излучения из нагретой плазмы, для его охлаждения предусмотрена прокачка охлаждающей жидкости во внутренних полостях, устроенных в стенках этого цилиндра. Жидкость будет подводиться к внутреннему цилиндру через каналы в торцевом фланце, к которому приварен этот цилиндр.

5. Тепловая изоляция. Для существенного подавления теплопритока к гелиевой камере за счет инфракрасного излучения стенок внешнего кожуха вся поверхность кожуха изнутри выстлана суперизоляцией, представляющей собой многослойное пленочное покрытие с напылением. Все отверстия в суперизоляции сделаны в виде разрезов, через которые пропускаются элементы креплений, растяжки и т.д.

6. Кριοкулер. На внешнем кожухе закреплены три кριοкулера, обеспечивающих криостатирование сверхпроводящей обмотки. Кριοкулеры соединены непосредственно с гелиевым объемом и тепловыми экранами медными шинами, обеспечивающими теплосъем.

Краткое описание модели.

Сверхпроводящий соленоид.

1. Катушка магнитного поля.

1а. Внутренняя обмотка.

1б. Внешняя обмотка.

2. Гелиевая камера.

3. Горловина для заливки гелия.

4. Кевларовая растяжка.

5. Тепловой экран №1.

6. Тепловой экран №2.

7. Внешний кожух.

8. Кριοкулер.

9. Токовводы.

10. Порт откачки.

11. Подвод воды для охлаждения внутренней стенки.

12. Суперизоляция.

Таким образом устройство отличается от аналога тем, что имеет возможность создания гофрированной конфигурации магнитного поля, состоящей из трех пробкотронов, имеет возможность плавного изменения величины пробочного отношения (гофрировки) магнитного поля за счет управления токами и двойных независимых обмоток соленоида. В конструкции предусмотрена возможность установки последовательно нескольких идентичных соленоидов, для создания протяженного магнитного поля гофрированной конфигурации. В конструкции предусмотрены силовые элементы, обеспечивающие удержание соленоида в продольном направлении при больших усилиях (до 15 тонн) вдоль оси магнитного поля. В конструкции внутренняя стенка кожуха соленоида (станка вакуумной камеры для проведения эксперимента) оснащена водяным охлаждением.

#### Формула изобретения

1. Сверхпроводящий соленоид с гофрированным магнитным полем для удержания плазмы, выполненный из NbTi провода, пропитанного эпоксидным компаундом, и



помещенный в горизонтальный криостат, причем внутренний диаметр кожуха соленоида используется как стенка вакуумной камеры, отличающийся тем, что он состоит из двух независимых и имеющих раздельные токовводы магнитных обмоток, причем внешняя обмотка намотана последовательно.

5 2. Сверхпроводящий соленоид по п. 1, отличающийся тем, что в конструкции наружной цилиндрической оболочки сделаны крепления для монтажа съемных торцевых фланцев для установки последовательно нескольких идентичных соленоидов.

3. Сверхпроводящий соленоид по п. 1, отличающийся тем, что в его конструкции предусмотрены силовые элементы, обеспечивающие удержание соленоида в продольном  
10 направлении при возникновении больших усилий, например, до 15 тонн, вдоль оси магнитного поля возникающих вследствие взаимного притяжения/отталкивания соседних соленоидов.

4. Сверхпроводящий соленоид по п. 1, отличающийся тем, что внутренняя стенка кожуха соленоида, она же стенка вакуумной камеры для проведения эксперимента,  
15 оснащена водяным охлаждением.

20

25

30

35

40

45