



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК  
*H05H 13/00 (2019.08)*

(21)(22) Заявка: 2019101841, 23.01.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
23.01.2019

Дата регистрации:  
04.10.2019

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 23.01.2019

(45) Опубликовано: 04.10.2019 Бюл. № 28

Адрес для переписки:  
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, ОИЯИ, ОЛИС

(72) Автор(ы):

Бунятов Карен Степанович (RU),  
Ширков Григорий Дмитриевич (RU),  
Ширков Степан Григорьевич (RU),  
Карамышева Галина Анатольевна (RU),  
Карамышев Олег Владимирович (RU),  
Малинин Владимир Александрович (RU),  
Гурский Семен Владимирович (RU),  
Попов Дмитрий Всеволодович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2373673 C1, 20.11.2009. RU 2521829 C2, 10.07.2014. RU 2543613 C2, 10.03.2015. WO 2005094142 A2, 06.10.2005.

## (54) СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КОМПАКТНЫЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН

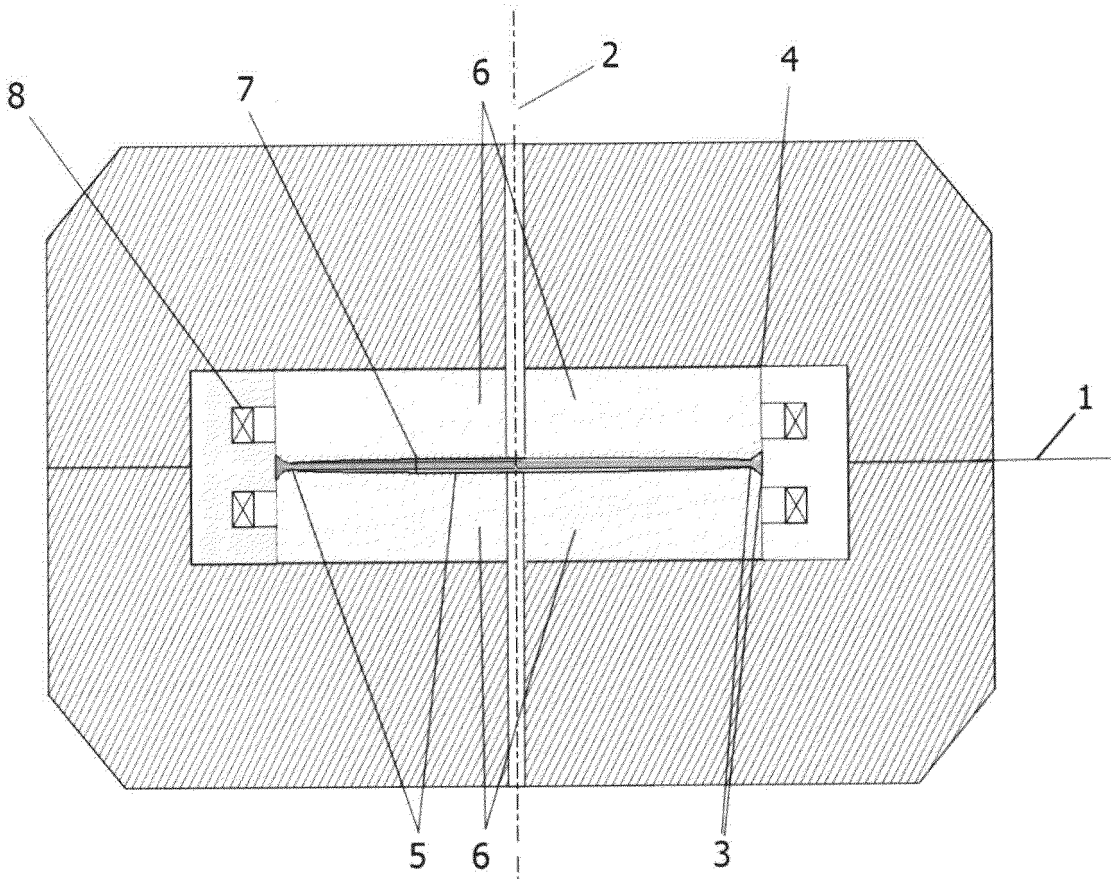
(57) Реферат:

Изобретение относится к сверхпроводящему компактному изохронному циклотрону. Изобретение может быть использовано при создании компактных изохронных циклотронов на сверхпроводящих магнитах в медицине для лечения онкологических заболеваний и новообразований, а также в научных исследованиях. Циклотрон включает расположенные симметрично медианной плоскости по меньшей мере три пары секторов магнитов с переменной азимутальной протяженностью и изменяющимся по высоте

вертикальным зазором между секторами (7). Высота зазора уменьшается от центра к зоне вывода в средней зоне ускорения (5) и, достигнув минимального значения в зоне вывода (3), увеличивается к краю полюса магнита (4). Техническим результатом является возможность создания компактной структуры магнита, формирующего изохронное поле в средней зоне ускорения и спадающее в зоне вывода, обеспечивая хорошую фокусировку пучка на выводе из циклотрона. 5 ил.

RU 2 702 140 C1

RU 2 702 140 C1



Фиг.1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11)**2 702 140** (13) **C1**(51) Int. Cl.  
*H05H 13/00* (2006.01)(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(52) CPC  
*H05H 13/00 (2019.08)*(21)(22) Application: **2019101841, 23.01.2019**(24) Effective date for property rights:  
**23.01.2019**Registration date:  
**04.10.2019**

Priority:

(22) Date of filing: **23.01.2019**(45) Date of publication: **04.10.2019 Bull. № 28**

Mail address:

**141980, Moskovskaya obl., g. Dubna, ul. Zholio-  
Kyuri, 6, OIYAI, OLIS**

(72) Inventor(s):

**Bunyatov Karen Stepanovich (RU),  
Shirkov Grigorij Dmitrievich (RU),  
Shirkov Stepan Grigorevich (RU),  
Karamysheva Galina Anatolevna (RU),  
Karamyshev Oleg Vladimirovich (RU),  
Malinin Vladimir Aleksandrovich (RU),  
Gurskij Semen Vladimirovich (RU),  
Popov Dmitrij Vsevolodovich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Obedinennyj institut yadernykh issledovanij  
(OIYAI) (RU)**(54) **SUPERCONDUCTING COMPACT ISOCHRONOUS CYCLOTRON**

(57) Abstract:

FIELD: magnets.

SUBSTANCE: invention relates to superconducting compact isochronous cyclotron. Invention can be used in creation of compact isochronous cyclotrons on superconducting magnets in medicine for treating oncological diseases and new growths, as well as in scientific research. Cyclotron includes at least three pairs of sectors of magnets arranged in symmetry with median plane with variable azimuth length and varying

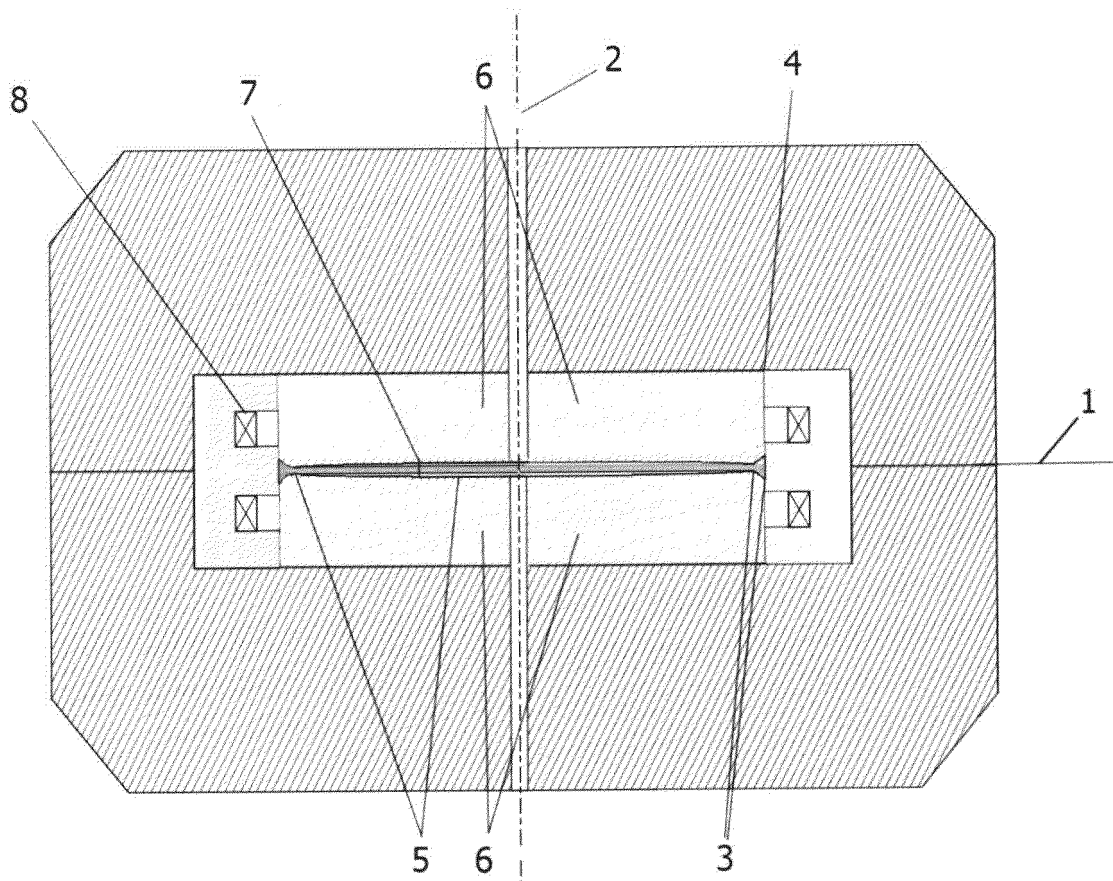
vertical clearance between sectors (7). Clearance height decreases from center to outlet zone in middle acceleration zone (5) and, reaching minimum value in output zone (3), increases to edge of magnet pole (4).

EFFECT: technical result is possibility of creation of compact structure of magnet forming isochronous field in middle zone of acceleration and falling in output zone, providing good beam focusing at cyclotron output.

1 cl, 5 dwg

RU 2 702 140 C1

RU 2 702 140 C1



Фиг.1

## Область техники

Сверхпроводящий компактный изохронный циклотрон относится к области техники ускорителей частиц. В настоящее время ускорители такого типа используются в основном в медицине, для лечения онкологических заболеваний и новообразований с помощью протонной терапии и для производства различных медицинских изотопов в ядерной медицине. Одной из главных проблем при разработке и проектировании компактных изохронных циклотронов для протонной терапии со сверхпроводящими катушками (8), с магнитным полем (3-4 Тл.), являются сложности обеспечения требуемых параметров пучка на выводе пучка ускоренных частиц из компактного циклотрона. При выводе из циклотрона пучок частиц попадает в зону резко спадающего магнитного поля у края полюса магнита, вследствие чего перефокусируется и увеличивается в размерах. Важным критерием качества пучка для протонной терапии является обеспечение максимально малой расходимости потока частиц по краям пучка с сохранением постоянных геометрических размеров выводимого пучка (эммитанс пучка меньше или равен  $5\pi$  мм. мрад). Актуальность разработки более совершенных изохронных циклотронов, с оптимальными для протонной терапии параметрами, обусловлена интенсивным развитием протонной терапии в мире за последние десять лет и удвоением количества вновь построенных специализированных медицинских центров протонной терапии в мире за последние пять лет.

## Уровень техники

Формирование изохронного магнитного поля циклотрона в средней зоне ускорения, как правило, осуществляется за счет изменения азимутальной протяженности секторов магнита (6), корректирующих магнитное поле шин секторов и шин долин магнита. В литературе известно несколько различных подходов к формированию изохронного поля циклотрона. Так, например, в сверхпроводящем циклотроне фирмы Sumitomo Heavy Industries (Япония) (H. Tsutsui, et al, Design Study of a Superconducting AVF Cyclotron for Proton Therapy, Cyclotrons2013: Proceedings of the 20th International Conference on Cyclotrons and their Applications, p 102.) используется переменная азимутальная протяженность секторов магнита, образующих узкий, не меняющийся по высоте вертикальный зазор. В циклотроне фирмы ACCEL/Varian (США) (Volker Schirrmeister, "Particle Therapy with the Varian / ACCEL 250 MeV S.C. Proton Cyclotron", 1st Workshop HADRON BEAM THERAPY OF CANCER, ERICE -SICILY, 24 APRIL -1 MAY 2009) используется широкий, более 50 мм зазор с постоянной высотой. В циклотроне фирмы IBA (Бельгия), модификация C-235 (D. Vandeplassche, et al, "Extracted beams from IBA's C235", Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference Vancouver, B.C., Canada 12-16 May 1997) (прототип) помимо секторов с переменной азимутальной протяженностью (9), используется вертикальный зазор эллиптической формы, уменьшающийся по высоте от центра к краю полюса магнита.

Недостатком этого и других циклотронов является то, что при выводе из циклотрона пучок протонов попадает у края полюса магнита в зону резко спадающего магнитного поля, вследствие чего, перефокусируется и увеличивается в размерах.

## Раскрытие изобретения

Технической задачей, выполняемой изобретением, является возможность формирования изохронного магнитного поля в средней зоне ускорения и спадающего магнитного поля в зоне вывода (см. Фиг. 4), которое обеспечивает вывод пучка с требуемыми для протонной терапии параметрами (эммитанс пучка меньше или равен  $5\pi$  мм. мрад)

Решение технической задачи осуществляется за счет того, что высота зазора

относительно медианной плоскости (1) уменьшается от центра к зоне вывода и, достигнув минимального значения в зоне вывода, увеличивается к краю полюса магнита.

Перечень фигур:

Фиг. 1 Зазор между секторами магнита

- 5 1. Медианная плоскость
2. Центральная ось, центр циклотрона
3. Зона вывода пучка из циклотрона
4. Край полюса магнита
5. Средняя зона ускорения
- 10 6. Сектора магнита с переменной азимутальной протяженностью
7. Высота зазора между полюсами магнита (переменная величина)
8. Сверхпроводящие катушки, помещенные в криостат

Фиг. 2. Вид циклотрона в горизонтальном разрезе

6. Сектора магнита с переменной азимутальной протяженностью
- 15 9. Азимутальная протяженность сектора
10. Начальный радиус ускорения пучка частиц
11. Конечный радиус пучка частиц в зоне вывода из циклотрона

Фиг. 3. Огибающая пучка в горизонтальной плоскости (а), в вертикальной плоскости (б), где по оси X - расстояние, пройденное пучком в зоне вывода (мм.), по оси Y - огибающая пучка (мм), h - в горизонтальной плоскости (Фиг. 3 а), z - в вертикальной плоскости (Фиг. 3 б)

12. Участок траектории частиц при прохождении пучком электростатического дефлектора
13. Участок траектории частиц при прохождении пучком у края сектора магнита
- 25 14. Участок траектории частиц при прохождении долины магнитной системы циклотрона
15. Участок траектории частиц при прохождении пучком 1-го магнитного канала
16. Участок траектории частиц при прохождении пучком 2-го магнитного канала
17. Участок траектории частиц при прохождении пучком ярма магнита

Фиг. 4 Эммитанс пучка в горизонтальной плоскости (а), в вертикальной плоскости (б), где по оси X положение частиц пучка (мм), по оси Y импульс частиц (рх, mrad)

Фиг. 5 График индукции магнитного поля,

где по оси X - расстояние от центра (мм.), по оси Y - значения индукции магнитного поля (Тл)

- 35 18. Область изохронного магнитного поля
  19. Область спадающего магнитного поля в зоне вывода потока частиц из циклотрона
- Осуществление изобретения

Описанное изобретение применимо в основном к компактным изохронным циклотронам с магнитным полем 3 - 4Тл. Результатом реализации изобретения является физический проект изохронного циклотрона со средним магнитным полем до 3,6 Тл., включающий в себя 3-D модели основных систем циклотрона. Данный циклотрон имеет зазор переменной высоты (7) между секторами магнита (6). Зазор имеет сложную форму, сужающуюся от центра (2) и среднюю зону (5) к зоне вывода (3) и расширяющуюся от точки с минимальной высотой зазора к краю полюса магнита (4).

45 Пример выполнения устройства

Для исследования применимости предложенного устройства магнитной системы циклотрона было проведено математическое моделирование. Анализ проводился на примере компактного изохронного циклотрона со средним магнитным полем до 3,6

Тл.

Моделирование и расчет магнитного поля циклотрона проводился с помощью программы CST Studio и Comsol MultyPhysics

Переменная высота зазора в промежутке от центра до зоны вывода определялась по формуле

$$\text{Half Gap} = a(c - R/\text{мм})^b - d(c - R/\text{мм})$$

Где Half Gap- половина значения максимальной высоты вертикального зазора в промежутке от центра до зоны вывода

Переменная высота зазора в промежутке от точки с минимальным значением высоты зазора до края полюса магнита определялась по формуле

$$\text{Half Gap (extraction zone)} = \text{Half Gap min} + (R - R_0) * M / (R_e - R_0)$$

Half gap (extraction zone) - половина значения максимальной высоты вертикального зазора в промежутке от точки с минимальным значением высоты зазора до края полюса магнита (4).

Где a, b, c, d - константы, подбираемые опытным путем (методом подбора), с целью получения условий для формирования изохронного поля

a - расчетно подбираемый параметр, определяющий максимальную величину вертикального зазора в центре;

b - расчетно подбираемый параметр, определяющий угол кривизны зазора в точке с минимальной величиной зазора;

c - расчетно подбираемый параметр, определяющий минимальную величину зазора, подобранный таким образом, чтобы минимальная величина зазора приходилась на конец основной зоны ускорения;

d - параметр, корректирующий угол наклона зазора;

R - радиус циклотрона;

R<sub>0</sub> - радиус сектора магнита в центре циклотрона (10);

R<sub>e</sub> - радиус сектора магнита в зоне вывода пучка из циклотрона (11);

Для компактного изохронного циклотрона со средним магнитным полем до 3,6 Тл.: a=2,7; b=0,37; c=610; d=0,0175; R равен от 0 до 630 мм

Результаты расчетов подтверждают возможность достижения изохронного поля с точностью до величины 1 Гаусс и получения требуемых частот бетатронных осцилляции.

На графике, представленном по результатам моделирования на Фиг. 3 видно, что огибающая пучка в горизонтальной плоскости (а) и вертикальной плоскости (б) не выходят за пределы 5 мм.

Пучок частиц, проходя электростатический дефлектор (12), фокусируется, проходя вдоль края сектора (13), затем через долину магнита (14) проходит через первый магнитный канал (15) и второй магнитный канал (16) и выходит, проходя ярмо магнита (17).

Эммитанс пучка в горизонтальной плоскости, представленный на Фиг. 4 (а) и в вертикальной плоскости, представленный на Фиг. 4 (б) показывает, что его значение меньше или равен 5л мм. мрад

График, представленный на Фиг. 5 показывает рост среднего магнитного поля изохронного циклотрона (область 18) с увеличением радиуса траектории движения пучка частиц и резкий спад магнитного поля в зоне вывода пучка частиц из циклотрона (область 19)

Таким образом, предлагаемое изобретение позволяет спроектировать компактную структуру магнита, формирующего изохронное поле в средней зоне ускорения и спадающее в зоне вывода, обеспечив хорошую фокусировку пучка на выходе из

циклотрона.

Литература:

1. H. Tsutsui, et al, Design Study of a Superconducting AVF Cyclotron for Proton Therapy, Cyclotrons2013: Proceedings of the 20th International Conference on Cyclotrons and their Applications, p 102.
2. Volker Schirrmeister, "Particle Therapy with the Varian / ACCEL 250 MeV S.C. Proton Cyclotron", 1st Workshop HADRON BEAM THERAPY OF CANCER, ERICE -SICILY, 24 APRIL - 1 MAY 2009
3. D. Vandeplasseche, et al, "Extracted beams from IBA's C235", Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference Vancouver, B.C., Canada 12-16 May 1997

(57) Формула изобретения

Сверхпроводящий компактный изохронный циклотрон, включающий в себя расположенные симметрично медианной плоскости по меньшей мере три пары секторов магнитов с переменной азимутальной протяженностью и изменяющимся по высоте вертикальным зазором между указанными секторами, отличающийся тем, что высота указанного зазора уменьшается от центра к зоне вывода и, достигнув минимального значения в зоне вывода, увеличивается к краю полюса магнита.

20

25

30

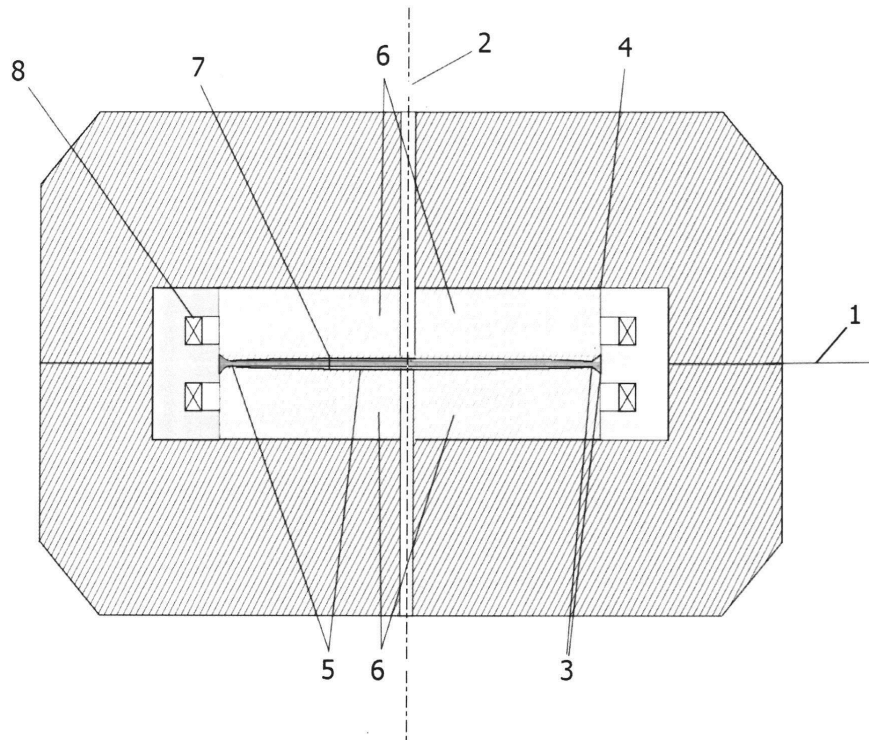
35

40

45

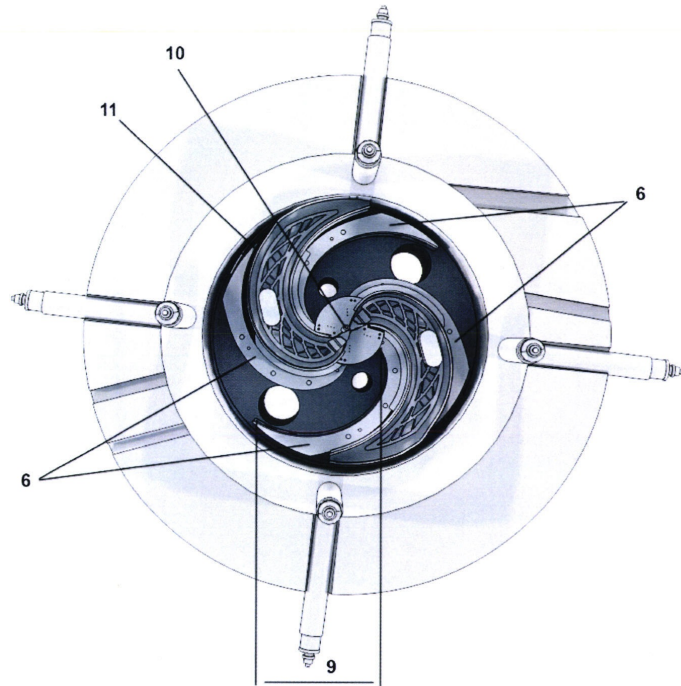


1

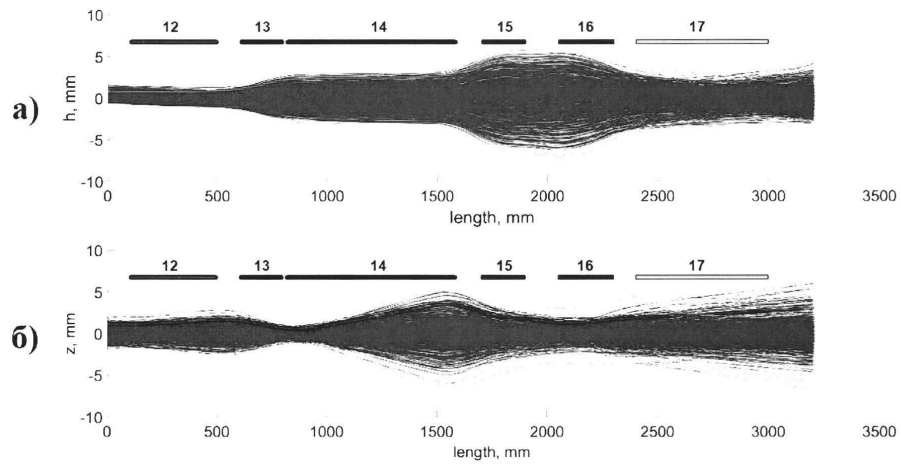


Фиг.1

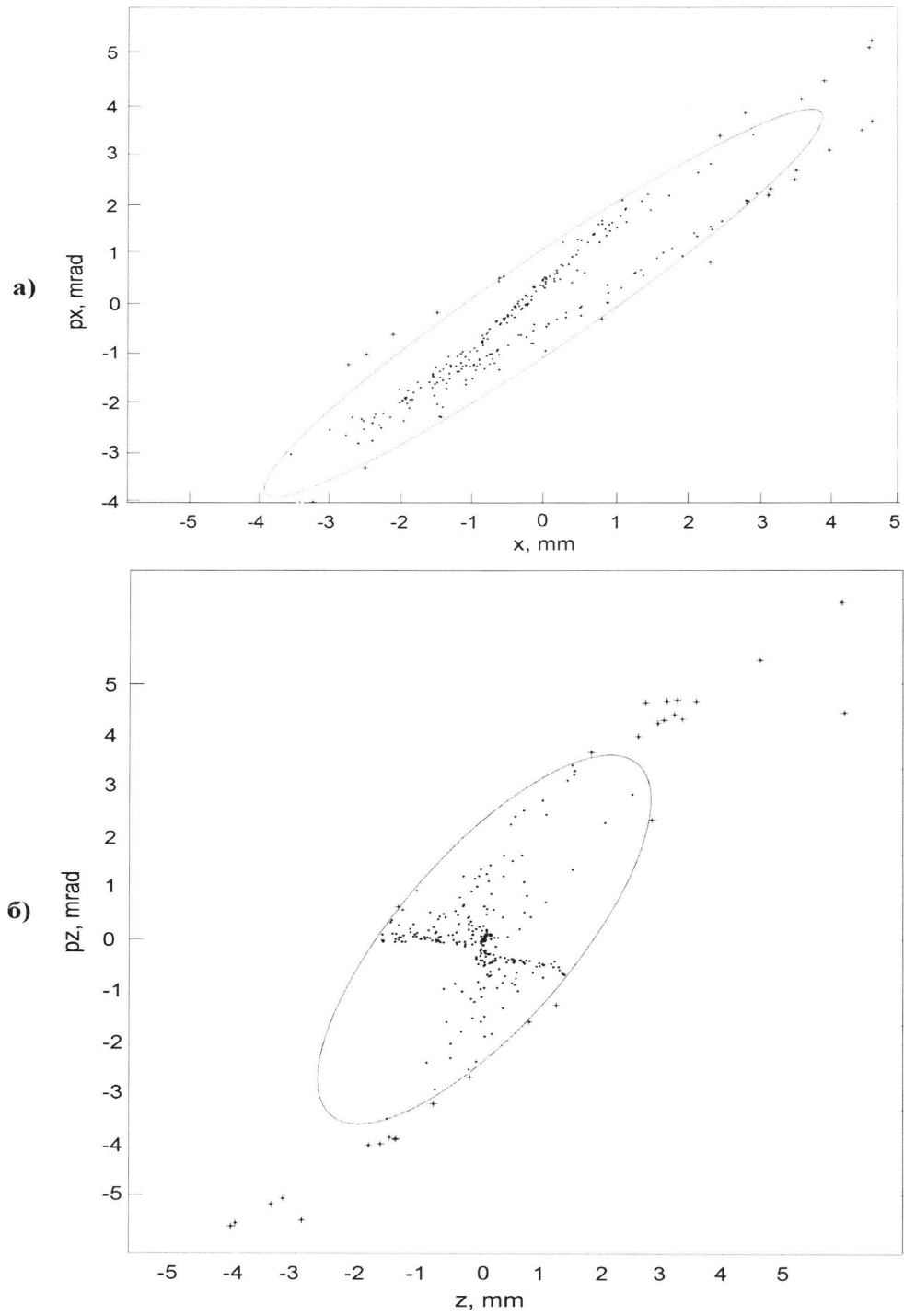
2



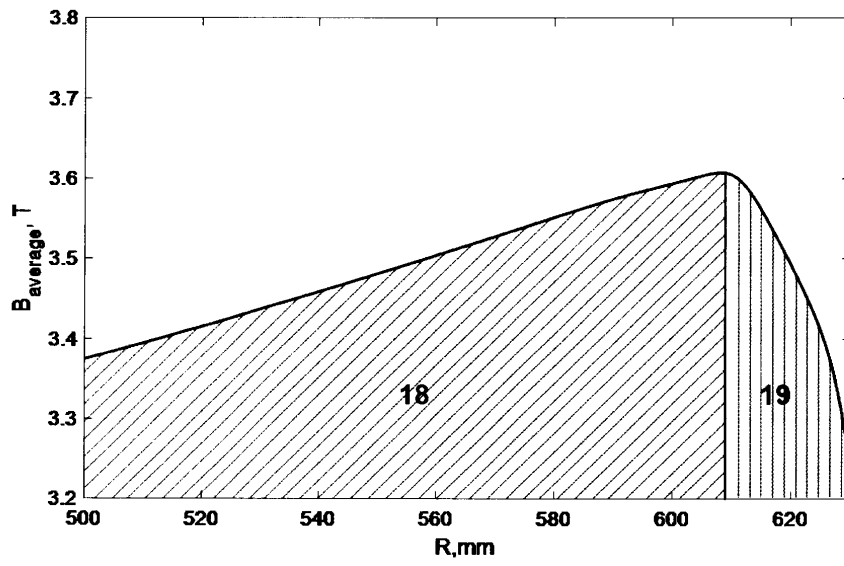
Фиг. 2



Фиг.3



Фиг.4



Фиг. 5