



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **123837** (13) **C2**  
(51) МПК (2021.01)  
**F25D 3/10** (2006.01)  
**H01L 39/00**  
**F25B 19/00**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: <b>а 2019 01127</b>	(72) Винахідник(и): <b>Варюхін Дмитро Вікторович (UA), Таряник Микола Васильович (UA), Федюк Дмитро Олегович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>04.02.2019</b>	(73) Володілець (володільці): <b>Варюхін Дмитро Вікторович, пр. Панфілова, 20-б, кв. 26, м. Донецьк, 83114 (UA), Таряник Микола Васильович, бул. Шевченка, 87, кв. 33, м. Донецьк, 83052 (UA), Федюк Дмитро Олегович, вул. Нижньо-Курганська, 25, кв. 128, м. Донецьк, 83092 (UA)</b>
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>10.06.2021</b>	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: US 3662566 A, 16.05.1972 JP S63178570 A, 22.07.1988 JP 200654444 A, 23.02.2006 SU 421864 A1, 30.03.1974 SU 981781 A1, 15.12.1982 SU 1508063 A1, 15.09.1989 UA 18778 U, 15.11.2006 UA 38110 U, 25.12.2008 UA 64099 U, 25.10.2011 UA 98974 C2, 10.07.2012
(41) Публікація відомостей про заявку: <b>10.08.2020, Бюл.№ 15</b>	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>09.06.2021, Бюл.№ 23</b>	

## (54) КРІОМАГНІТНА СИСТЕМА

### (57) Реферат:

Кріомагнітна система належить до кріогенної техніки та технічної фізики. Система включає кріостат, який містить корпус, азотну і гелієву ємності, радіаційний екран та надпровідниковий соленоїд. В нижній частині корпусу кріостату виконано наскрізний горизонтальний циліндричний канал із установленою в ньому трубою, торці якої жорстко закріплені на корпусі кріостату. Гелієва ємність виконана у вигляді циліндра з наскрізним боковим циліндричним каналом й встановленою в ньому трубою з соленоїдом. Труби гелієвої ємності й горизонтального каналу корпусу є коаксіальні, а осі гелієвої ємності, соленоїда й горизонтального каналу корпусу кріостату співпадають. Зовні труби горизонтального отвору корпусу кріостату симетрично відносно центра соленоїда встановлено й жорстко закріплено три циліндричні вставки у вигляді тонкостінних порожнистих циліндрів, одну із вставок розміщено у центрі соленоїда, довжина якої залежить від намагніченості матеріалу вставки, сили магнітної взаємодії вставки й соленоїда, градієнту магнітного поля соленоїда в області розміщення вставки, а також внутрішнього та зовнішнього радіуса вставки. Дві інші вставки однакових розмірів встановлено симетрично відносно центра соленоїду зі сторони його торців за радіаційним екраном кріостату.

UA 123837 C2

При цьому діаметр внутрішнього отвору цих вставок становить не менше діаметру внутрішнього отвору соленоїда. Всі вставки виготовлено із феромагнітного матеріалу з високим значенням індукції насичення. Технічним результатом винаходу є спрощення кріомагнітної системи в цілому, підвищення її надійності та економічності в експлуатації при дії силових навантажень зі сторони зовнішнього магнітного оточення.

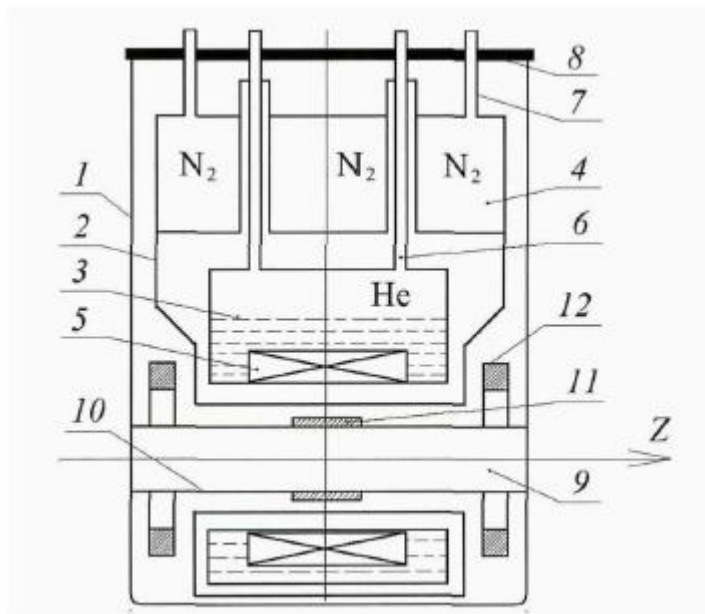


Fig. 1

Винахід належить кріогенної техніки та технічної фізики й може бути використаний у складі кріомагнітної системи з надпровідниковим соленоїдом для створення сильного магнітного поля.

Відома кріомагнітна система, яка описана у статі "Криомагнитная система мазера на циклотронном резонансе", ПТЭ, N5, 1989, с. 259. Кріомагнітна система містить металевий кріостат у складі гелієвої і азотної ємностей, радіаційні екрани з температурою 20, 50 й 77 K та надпровідникову магнітну систему, яку встановлено у гелієвій ємності кріостата. У нижній частині кріостату магнітна система співвісна наскрізному горизонтальному каналу діаметром 90 мм. Гелієва ємність підвішена на двох тонкостінних трубках - горловинах, які використовуються для заправки кріостату зрідженим гелієм, виходу парів гелію та розміщення пристроїв для живлення струмом магнітної системи. На дні кріостату встановлено пристрій фіксації гелієвої ємності з магнітною системою, який дозволяє передавати механічні зусилля від гелієвої ємності на корпус кріостату при транспортуванні. При роботі кріомагнітної системи у режимі створення магнітного поля пристрій фіксації гелієвої ємності видаляється і остання разом з азотною ємністю, радіаційними екранами залишається підвішеною лише на горловинах.

Недоліком цієї кріомагнітної системи є те, що вона не призначена для роботи в умовах дії силових зусиль збоку зовнішнього магнітного оточення, а також при відхиленні від вертикального положення.

Також відома кріомагнітна система, яка описана в а.с. N719361, М.Кл. H01F 7/22, заявлена 06.11.1979 г. Відома система містить кріостат у складі корпусу, азотної та гелієвою ємності, в якій встановлено надпровідниковий соленоїд, а також радіаційний екран. Торцеві фланці каркасу соленоїда, гелієва ємність і верхня торцева частина радіаційного екрану виконано із низькотемпературного феромагнетика, наприклад, диспрозю; бокові стінки радіаційного екрану й корпусу кріостату виконано із феромагнетика з більш високою магнітною проникністю, наприклад, пермалою або мю-металу. У нижній частині кріостату, від гелієвої ємності до радіаційного екрану та від радіаційного екрану до корпусу, встановлено силові розтяжки з нержавіючої сталі, які використовуються для компенсації механічних зусиль магнітного походження при виникненні не співвісності виготовлених з магнітного матеріалу та намагнічених полем соленоїда вищезначених вузлів кріостата.

До недоліків кріомагнітної системи відносяться:

- складна конструкція за рахунок використання та установки системи силових розтяжок як між гелієвою ємністю і радіаційним екраном, так і між екраном та корпусом кріостату;
- низька економічність за рахунок додаткового підводу тепла по розтяжках від кожуха до екрану та від екрану до гелієвої ємності й, відповідно, додаткових витрат зрідженого гелію.

Найбільш близьким до заявленого технічного рішення є кріомагнітна система гіротрона (Бородачева Т.В. и др. Сверхпроводящие магнитные системы гиротронов. В кн. Гиротрон, г. Горький, ИПФ АН СССР, 1981, с. 229-235). Кріомагнітна система включає в себе гелієвий кріостат у складі корпусу, азотної й гелієвої ємностей, радіаційного екрану, а також надпровідниковий соленоїд, який розміщено у гелієвій ємності. У нижній частині кріостату виконано наскрізним циліндричний горизонтальний "теплий" канал, вісь якого співпадає з віссю надпривідникового соленоїда. Жорсткість підвісу гелієвої ємності з соленоїдом у кріостаті забезпечується використанням вертикальних трубок та горизонтальних розтяжок. Одним кінцем трубки й розтяжки закріплено до гелієвої ємності з температурою 4,2 K, а іншим до корпусу кріостата з температурою 300 K.

Недоліком цієї кріомагнітної системи є:

- ускладнення конструкції кріостату для забезпечення жорсткості підвісу гелієвої ємності з надпровідниковим соленоїдом за рахунок використання додаткової системи вертикальних трубок і розтяжок, які розміщено у вакуумному об'ємі кріостату. Крім того, для забезпечення надійності високого вакууму у кріостаті необхідно виконувати спеціальні вузли для герметизації трубок і розтяжок у корпусі кріостату;
- зниження надійності кріомагнітної системи за рахунок ускладнення конструкції кріостату при використанні вище означеної системи підвісу гелієвої ємності із соленоїдом;
- зниження економічності при експлуатації кріомагнітної системи за рахунок додаткових витрат зрідженого гелію, пов'язаних з підведенням тепла по трубках та розтяжках від корпусу при температурі 300 K до гелієвої ємності з температурою 4,2 K.

В основу винаходу поставлена задача удосконалення кріомагнітної системи шляхом зміни конструкції окремих її вузлів, що дозволить спростити кріомагнітну систему в цілому, підвищити її надійність та економічність в експлуатації при дії силових навантажень зі сторони зовнішнього магнітного оточення.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що у системи що є кріомагнітна, яка включає кріостат, який містить корпус, азотну і гелієву ємності, радіаційний екран,

надпровідниковий соленоїд, в нижній частині корпусу кріостату виконано наскрізний горизонтальний циліндричний канал із установленою в ньому трубою, торці якої жорстко закріплені на корпусі кріостату, гелієва ємність виконана у вигляді циліндра з наскрізним боковим циліндричним каналом й встановленою в ньому трубою з соленоїдом, причому труби гелієвої ємності й горизонтального каналу корпусу є коаксіальні, а осі гелієвої ємності, соленоїда й горизонтального каналу корпусу кріостату співпадають, новим є те, що зовні труби горизонтального отвору корпусу кріостату симетрично відносно центра соленоїда встановлено й жорстко закріплено три циліндричні вставки у вигляді тонкостінних порожнистих циліндрів, одну із вставок розміщено у центрі соленоїда, розміри якої визначаються з виразу:

$$L = \frac{4F}{M \cdot \text{grad}H(R^2 - r^2)},$$

де  $L$  - довжина вставки,  $M$  - намагніченість матеріалу вставки,  $F$  - сила магнітної взаємодії вставки й соленоїда,  $\text{grad}H$  - градієнт магнітного поля соленоїда в області розміщення вставки,  $r$  й  $R$  - внутрішній та зовнішній радіуси вставки, а дві інші вставки однакових розмірів встановлено симетрично відносно центра соленоїду зі сторони його торців за радіаційним екраном кріостату, при цьому діаметр внутрішнього отвору цих вставок становить не менше діаметра внутрішнього отвору соленоїда. Всі вставки виготовлено із феромагнітного матеріалу з високим значенням індукції насичення.

Розміщення зовні на трубі горизонтального каналу кріостату трьох симетрично встановлених відносно центра соленоїда вставок у вигляді тонкостінних циліндрів спрощує конструкцію гелієвого кріостату при дії механічних зусиль магнітного походження за рахунок відсутності додаткової системи трубок та розтяжок у вакуумній ємності кріостату від його корпусу до гелієвої ємності.

Розміщення феромагнітної вставки зовні на трубі "теплого" горизонтального каналу кріостату, коли її центр співпадає з центром надпровідникового соленоїда, забезпечує велику за абсолютною величиною силу їх магнітної взаємодії у напрямку вісі соленоїда й, відповідно, жорсткість підвісу гелієвої ємності з соленоїдом у кріостаті за рахунок того, що при дії на соленоїд зовнішнього магнітного оточення механічні зусилля магнітного походження, які виникають між магнітним оточенням та соленоїдом, будуть передаватися на металевий корпус кріостату за допомогою намагніченої в полі соленоїда вставки й труби "теплого" каналу. При заданих внутрішнім та зовнішнім радіусах вставки її довжина визначається виразом:

$$L = \frac{4F}{M \cdot \text{grad}H(R^2 - r^2)}$$

де  $L$  - довжина вставки,  $M$  - намагніченість матеріалу вставки,  $F$  - сила магнітної взаємодії вставки й соленоїда,  $\text{grad}H$  - градієнт магнітного поля соленоїда в області розміщення вставки,  $r$  й  $R$  - внутрішній та зовнішній радіуси вставки.

Розміщення двох однакових вставок на трубі "теплого" горизонтального каналу збоку торців і симетрично відносно центра соленоїда, діаметр внутрішнього отвору яких вибрано не менше діаметру отвору соленоїда й в області магнітного поля, в якій мають місце великі градієнти поля в осьовому та радіальному напрямках соленоїда, забезпечує великі сили магнітної взаємодії вставок із соленоїдом у цих напрямках, а також стійкість останніх у радіальному напрямках.

Виконання циліндричних вставок з феромагнітного матеріалу з високим значенням індукції насичення забезпечує максимальну силу магнітної взаємодії вставок із соленоїдом й, відповідно, компенсацію значних механічних зусиль магнітного походження при дії зовнішнього магнітного оточення.

Надійність кріомагнітної системи забезпечується за рахунок спрощення системи підвісу гелієвої ємності із соленоїдом у кріостаті, а підвищення економічності - шляхом зменшення витрат зрідженого гелію за рахунок відсутності у кріостаті системи трубок та розтяжок та відсутності підводу тепла до гелієвої ємності з температурою 4,2 К від корпусу кріостата з температурою 300 К

Загальний вигляд кріомагнітної системи у розрізі показано на фіг. 1.

На фіг. 2 показано розміщення центральної вставки в отворі соленоїда та розподіл магнітного поля соленоїда в осьовому та радіальному напрямках.

На фіг. 3 наведені розміри центральної вставки.

На фіг. 4 представлено розподіл радіальної складової магнітного поля  $H_R$  соленоїда у радіальному напрямку.

Кріомагнітна система, фіг. 1, містить гелієвий кріостат у складі виготовлених з немагнітного матеріалу металевому корпусу 1, радіаційного екрану 2, гелієвої ємності 3, азотної ємності 4, горловин гелієвої 6 й азотної ємностей 7, верхнього несучого фланця 8, а також включає надпро-відниковий соленоїд 5, розміщений у гелієвій ємності 3 кріостату. У нижній частині кріостату співвісно отвору соленоїда 5 виконано "теплий" горизонтальний наскрізний канал 9, у якому розміщено трубу 10, на якій, в свою чергу, встановлено три феромагнітні вставки у вигляді тонкостінних порожнистих циліндрів - вставка 11 та дві однакові вставки 12. Геометричний центр вставки 11 співпадає з геометричним центром надпровідникового соленоїда 5, а дві вставки 12 встановлено зовні збоку торців соленоїда 5 й симетрично відносно його центра за радіаційним екраном 2, при цьому діаметр внутрішнього отвору вставок 12 вибрано не менше діаметру внутрішнього отвору соленоїда 5. Вставки 11 і 12 виготовлено із феромагнітного матеріалу з високим значенням індукції насичення. Торці труби 10 горизонтального отвору 9 жорстко закріплено на корпусі 1 кріостату.

У сильному магнітному полі над провідникового соленоїда вставки намагнічуються й між ними та соленоїдом виникає сила магнітної взаємодії, яка направлена у бік максимального магнітного поля, тобто в центр соленоїда. Сила магнітної взаємодії намагніченої вставки з соленоїдом у магнітному поле напруженістю  $H$  визначається виразом:

$$F = \frac{M}{4\pi \cdot \text{grad}H \cdot V}, \quad (1)$$

де:  $F$  - сила магнітної взаємодії,  $M$  - намагніченість матеріалу вставки,  $\text{grad}H$  - градієнт магнітного поля у місці розташування вставки,  $V$  - об'єм вставки.

Розміщення центральної вставки 11 в отворі соленоїда 5, а також розподіл складових магнітного поля останнього в осьовому  $H_z$  й радіальному  $F_R$  напрямках наведено на фіг. 2. а геометричні розміри вставки - на фіг. 3. Ця вставка, центр якої співпадає з центром соленоїда,

буде відчувати з боку останнього дію двох сил: одну, більшу за величиною силу  $F_z$ , яка направлена у напрямку осі до центра соленоїда та яка визначається величиною градієнта магнітного поля  $\text{grad}H$  у осьовому напрямку; та іншу, меншу за величиною, силу  $F_R$ , яка направлена у радіальному напрямку соленоїда, яка визначається градієнтом поля  $\text{grad}H$  у цьому напрямку. У зв'язку з тим, що градієнт магнітного поля у осьовому напрямку більший, ніж градієнт поля у радіальному напрямку, то й сили магнітної взаємодії  $F_z < F_R$ .

У соленоїда максимальне значення магнітного поля має місце не у його геометричному центрі, а на внутрішніх шарах обмотки й у більшості з них (з відносною їх довжиною  $\beta = L/D > 2,5$ , де  $L$  і  $D$  відповідно довжина й внутрішній діаметр соленоїда) перевищення поля на обмотці в порівнянні з з полем у центрі становить (1-2)%. Тому градієнт магнітного поля у радіальному напрямку не великий і направлений в бік обмотки соленоїда.

В осьовому напрямку магнітне поле соленоїда по відношенню до центрального зменшується більш вагомо, близько 5-10 % на тій же довжині, що і в радіальному напрямку, тому градієнт магнітного поля в осьовому напрямку суттєво більший, ніж градієнт поля у радіальному напрямку. Відповідно й сила магнітної взаємодії вставки з соленоїдом  $F_z$  у осьовому напрямку більш, ніж сила взаємодії у радіальному напрямку.

Якщо вісь соленоїда й вісь вставки співпадають, то на останню по круговій поверхні будуть діяти однакові сили у радіальному напрямку, тому результуюча цих сил буде дорівнювати нулю, а вставка буде мати стійке положення у радіальному напрямку. Якщо ж вісь соленоїда й вісь вставки не співпадають, наприклад, зміщені у радіальному напрямку, то результуюча сила не буде дорівнювати нулю й вона буде намагатися змістити вставку в бік обмотки соленоїда, тому вставка у радіальному напрямку не буде мати стійкого положення.

З метою усунення нестійкості центральної вставки у радіальному напрямку, а також збільшення сили її магнітної взаємодії з соленоїдом у напрямку вісі останнього додатково до центральної вставки використовують дві однакові вставки, які встановлено симетрично відносно центра збоку торців соленоїда. Останні розміщують в області магнітного поля, у якій градієнт поля у осьовому напрямку соленоїда й, відповідно, сила магнітної взаємодії вставок з соленоїдом  $F_z$ , буде направлена до центра соленоїда. Крім того, у цій області магнітного поля

радіальна складова поля  $H_R$  й, відповідно, градієнт поля у радіальному напрямку, зростає зі зменшенням відстані до вісі соленоїда. На фіг. 4 показано розподіл радіальної складової магнітного поля  $H_R$  у радіальному напрямку соленоїда, який характеризується спочатку зростанням  $H_R$  зі збільшенням радіусу до деякого радіуса  $R_o$ , а потім  $H_R$  зменшення. В області магнітного поля, у якій  $H_R$  зменшення, й встановлено вставки 12. На кожну із цих вставок буде діяти радіальна сила  $F_R$ , яка направлена у радіальному напрямку у бік вісі соленоїда, що забезпечує їх стійке положення у радіальному напрямку.

Таким чином, загальна сила магнітної взаємодії соленоїда з центральною та двома крайніми вставками  $F_Z$  у напрямку його вісі збільшиться, тому що сили взаємодії центральної та двох крайніх вставок з соленоїдом направлені в один бік - до центра соленоїда й вони складуються.

Сила магнітної взаємодії соленоїда з центральною вставкою  $F_R$  у радіальному напрямку направлена на зустріч такій же силі взаємодії соленоїда з двома крайніми вставками, тому ці сили віднімаються одна від іншої. Проте, у зв'язку з тим, що градієнт магнітного поля у радіальному напрямку в області магнітного поля, в якій розміщено центральну вставку, суттєво менший такого ж градієнта поля в області розміщення двох крайніх вставок, то сумарна сила взаємодії у радіальному напрямку буде направлена до вісі соленоїда, що забезпечить стійке положення вставок у радіальному напрямку.

Відповідно до запропонованого технічного рішення було розроблено кріомагнітну систему у складі гелієвого кріостата з наскрізним горизонтальним каналом діаметром 65 мм та над провідникового соленоїда. Останній має внутрішній діаметр 100 мм, зовнішній 180 мм, довжину 240 мм й створює магнітне поле з індукцією до 7 Т. Градієнт магнітного поля у напрямку вісі соленоїда на довжині 100 мм становить 6 Т/м, у радіальному напрямку близько 1,0 Т/м.

Центральна феромагнітна вставка, яка встановлена на трубі горизонтального каналу й центр якої співпадає з центром соленоїда, має наступні розміри: внутрішній діаметр 70 мм, зовнішній 76,5 мм й довжину 115 мм й виготовлена з магнітної сталі з індукцією насичення 2,1 Т. Сила магнітної взаємодії вставки із соленоїдом у напрямку вісі соленоїда становить 110 кг й направлена до центра соленоїда. Сила магнітної взаємодії у радіальному напрямку дорівнює 16 кг, проте вона направлена не до центра, а у бік обмотки соленоїда.

Дві однакові вставки, які встановлено на трубі горизонтального каналу збоку торців соленоїда за радіаційним екраном кріостата, мають такі розміри: внутрішній діаметр 110 мм, зовнішній 120 мм та довжину 60 мм. Сила магнітної взаємодії кожної вставки у осьовому напрямку соленоїда складає 34 кг; у радіальному 56 кг й направлена до вісі соленоїда.

Таким чином, сумарна сила магнітної взаємодії соленоїда із трьома вставками у напрямку його вісі становить:  $F_Z = (110 + 34) = 144$  кг; а у радіальному  $F_R = (56 - 16) = 40$  кг й направлена до вісі соленоїда, що забезпечує стійкість усіх трьох вставок у радіальному напрямку.

#### ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Кріомагнітна система, що включає кріостат, який містить корпус, азотну і гелієву ємності, радіаційний екран, надпровідниковий соленоїд, в нижній частині корпусу кріостата виконано наскрізний горизонтальний циліндричний канал із установленою в ньому трубою, торці якої жорстко закріплені на корпусі кріостата, гелієва ємність виконана у вигляді циліндра з наскрізним боковим циліндричним каналом й встановленою в ньому трубою з соленоїдом, причому труби гелієвої ємності й горизонтального каналу корпусу кріостата співпадають, яка **відрізняється** тим, що зовні труби горизонтального каналу корпусу симетрично відносно центра соленоїда встановлені та жорстко закріплені три циліндричні вставки у вигляді тонкостінних порожніх циліндрів, одна зі вставок розташована в центрі соленоїда, розміри якої визначаються з виразу:  $L = 4 \cdot F / M \cdot \text{grad}H \cdot (R^2 - r^2)$ , де  $L$  - довжина вставки,  $M$  - намагніченість матеріалу вставки,  $F$  - сила магнітної взаємодії вставки й соленоїда,  $\text{grad}H$  - градієнт магнітного поля соленоїда в області розміщення вставки,  $r$  і  $R$  - внутрішній та зовнішній радіуси вставки, дві інші вставки однакових розмірів встановлено симетрично відносно центра соленоїда збоку його торців за радіаційним екраном кріостату, при цьому діаметр внутрішнього отвору цих вставок становить не менше

діаметра внутрішнього отвору соленоїда, усі вставки виготовлені з феромагнітного матеріалу із високим значенням індукції насичення.

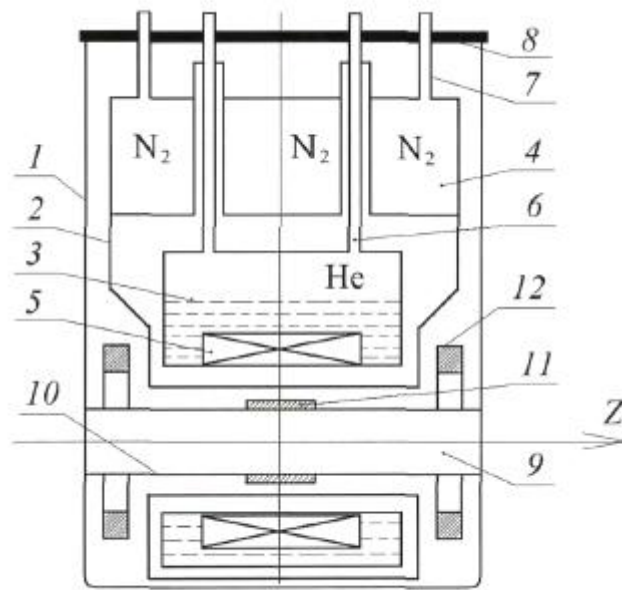


Fig. 1

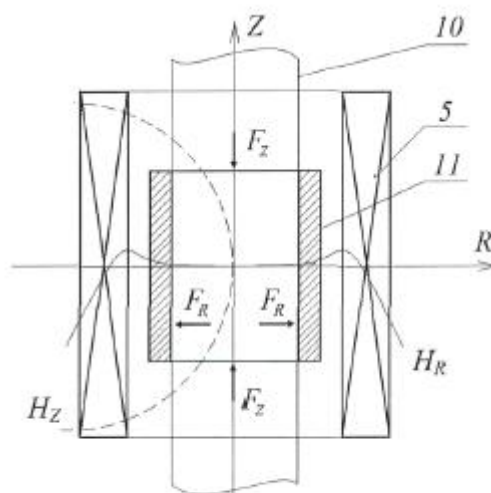


Fig. 2

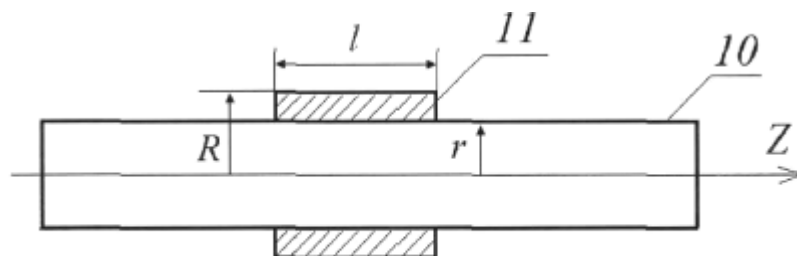
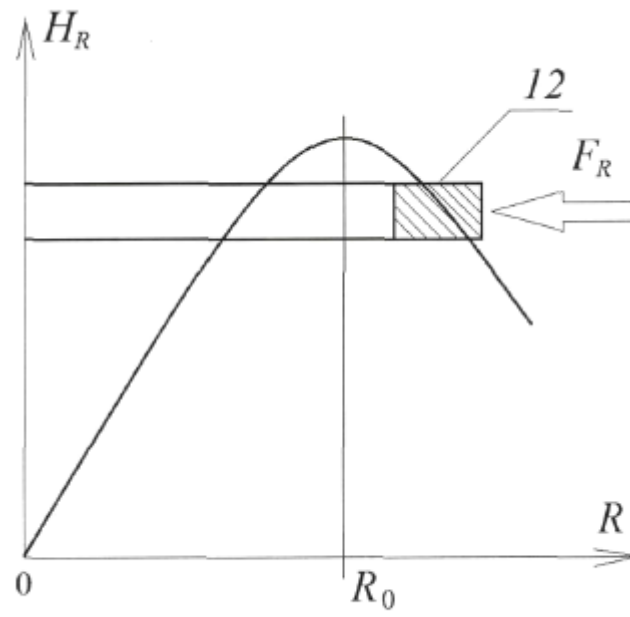


Fig. 3



Фіг. 4