



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **129381** (13) **C2**

(51) МПК (2025.01)

G01N 23/00**G21C 17/10** (2006.01)**G21C 17/06** (2006.01)**G21C 3/326** (2006.01)**G01N 23/222** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки: а 2018 12090	(72) Винахідник(и): Сенгбуш Еван Р. (US), Кобернік Арне В. (US), Молл Елі Р. (US), Сейферт Крістофер М. (US), Радель Росс Ф. (US), Томас Марк (US), Хекла Джейк (US)
(22) Дата подання заявки: 09.06.2017	(73) Володілець (володільці): ШАЙН ТЕКНОЛОДЖІС, ЛЛС, 3400 Innovation Court, Janesville, Wisconsin 53546, United States of America (US)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 10.04.2025	(74) Представник: Кістерський Кирило Арсенійович, реєстр. №207
(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: 62/347,969	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: KR 2010/0119194 A1, 09.11.2010 US 4902467 A, 20.02.1990 US 3728544 A, 17.04.1973 US 2002/0131542 A1, 19.09.2002 US 2010/0284504 A1, 11.11.2010 JP S646849 A, 11.01.1989 US 3755675 A, 28.08.1973 KR 2010/0076487 A, 06.07.2010 US 3636353 A, 18.01.1972 US 2013/129027 A1, 23.05.2013
(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: 09.06.2016	
(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку: US	
(41) Публікація відомостей про заявку: 10.05.2019, Бюл.№ 9	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 09.04.2025, Бюл.№ 15	
(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору РСТ: PCT/US2017/036744, 09.06.2017	

(54) СИСТЕМА І СПОСІБ АКТИВНОГО СКАНУВАННЯ ПАЛИВНОГО СТРИЖНЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**(57) Реферат:**

Надаються система і спосіб активного сканування паливного стрижня ядерного реактора. Система містить генератор нейтронів з електричним приводом, що містить іонне джерело, прискорювач і мішень; сповільнювач, що розташований навколо генератора нейтронів і виконаний з можливістю уповільнення нейтронів, згенерованих генератором нейтронів; канал для паливного стрижня, що розташований всередині сповільнювача, канал для паливного стрижня, що виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора і впливу на паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів із заданими параметрами; і множину детекторів випромінювання. Коли на паливний стрижень ядерного реактора діє потік нейтронів із заданими параметрами, нейтрони індують допоміжне випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію, що виявляються множиною детекторів випромінювання для визначення кількості

UA 129381 C2

речовини, що поділяється, в паливному стрижні ядерного реактора і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня ядерного реактора.

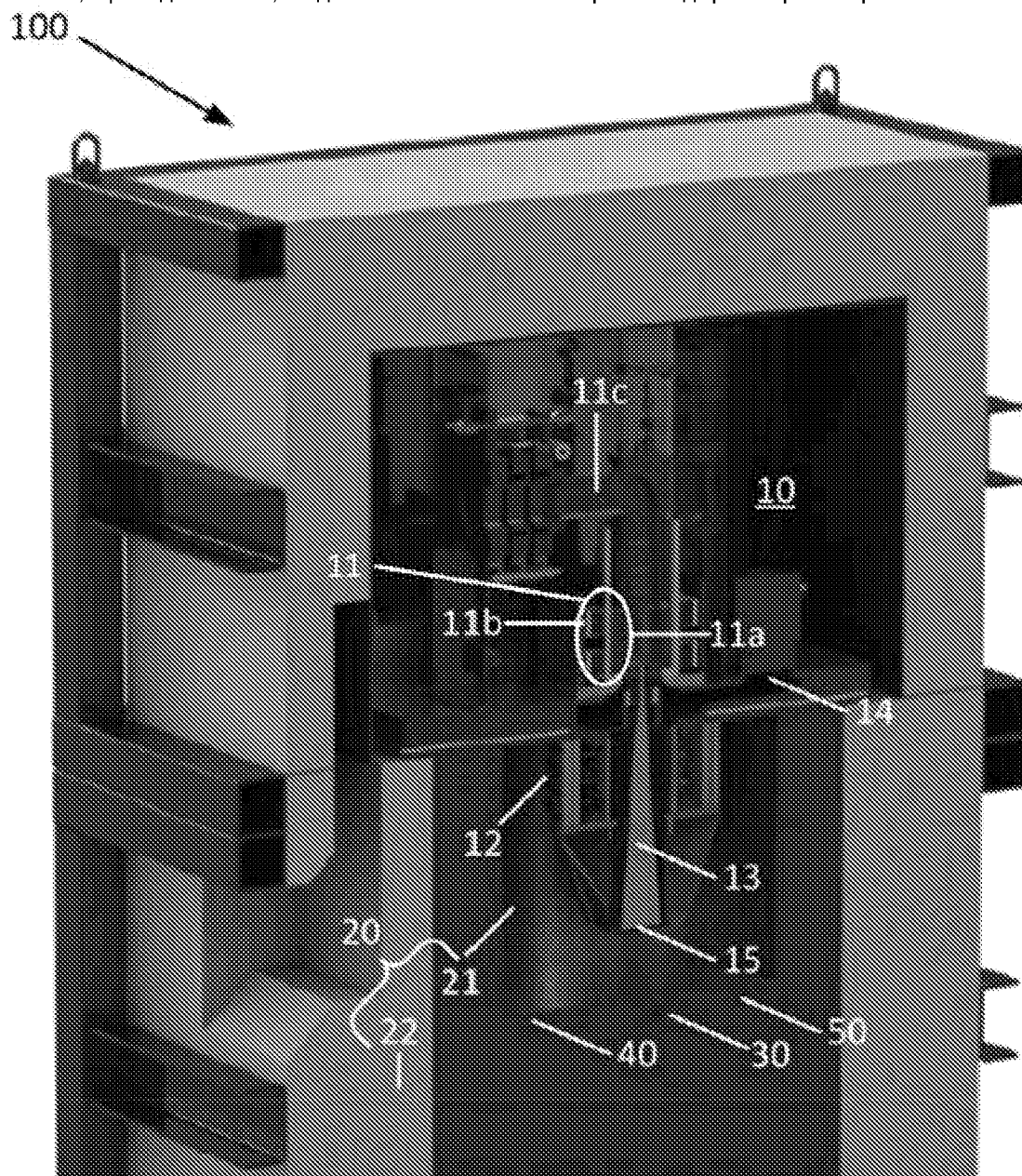


Fig. 1

Згідно з даною заявкою заявляється пріоритет відповідно до попередньої заявки на патент США 62/347 969, що подана 9 червня 2016 р., яка включена в даний документ у всій повноті за допомогою посилання.

Даний винахід відноситься в цілому до галузі сканування паливного стрижня ядерного реактора для виявлення змін збагачення за довжиною паливного стрижня. Більш конкретно, даний винахід відноситься до систем і способів активного сканування паливного стрижня ядерного реактора.

В цьому розділі наводиться інформація про попередній рівень техніки або контекст для винаходу, зазначеного у формулі винаходу. Тут можуть бути наведені концепції, які можуть бути реалізовані, але не обов'язково ті, які були раніше задумані або реалізовані. Тому, якщо не зазначено інше, відомості, що описані в цьому розділі, не є рівнем техніки для опису і формули даного винаходу і не можуть розглядатися як найближчий аналог.

Приблизно 20% електричної енергії в США виробляють ядерні реактори. Паливо, що використовується в таких ядерних реакторах, поставляється у формі невеликих таблеток діоксиду урану (UO_2), довжина яких становить приблизно 1 см (0,39 дюйма), а діаметр - 1 см (0,39 дюйма). Корисним паливом у цих таблетках є уран, зокрема, U-235 і U-238. Таблетки UO_2 укладають всередині металевої оболонки для утворення паливного стрижня, довжиною в діапазоні від приблизно 152,4 см (60 дюймів) до 406,4 см (160 дюймів). Потім множину паливних стрижнів складають у прямокутні пучки розміром 15 × 15 паливних стрижнів у пучку. У стандартному ядерному реакторі використовується від 150 до 200 пучків, що дорівнює приблизно 40 000 паливних стрижнів або приблизно 15 млн паливних таблеток.

Ядерні реактори дозаправляють приблизно кожні два роки. Під час кожної дозаправки приблизно одну третину паливних стрижнів замінюють. Таким чином, середній термін служби паливного стрижня становить приблизно шість років. Для подовження терміну служби ядерного палива були вжиті значні зусилля. Одним із способів, який довів свою ефективність, є введення «вигоряючого поглинача» в паливні таблетки. Як типові приклади вигоряючого поглинача можна навести гадоліній і бор. Ці матеріали називають поглиначами, тому як вони дуже ефективно поглинають теплові нейтрони. Зазвичай, теплові нейтрони являють собою нейтрони з енергією приблизно 0,5 еВ.

Енергію ядерні реактори створюють за допомогою ядерного поділу, тобто розщеплення атомів (наприклад, атомів урану) і використання енергії, яка виділилася, для нагріву води. Саме взаємодія нейтронів з ураном в ядерному паливі призводить до виникнення реакції поділу, і в результаті кожної реакції поділу відбувається випромінювання декількох нейтронів, які призводять до нових реакцій поділу, відповідно, критичної роботи (ланцюгова реакція) ядерного реактора. Введення вигоряючого поглинача в конкретних точках у конкретній кількості в ядерний реактор може уповільнити ланцюгову реакцію і спростити керування нею. Серед сприятливих ефектів такої дії слід зазначити збільшення тривалості кампанії ядерного реактора.

Щоб мати можливість керувати роботою ядерного реактора, необхідно жорстко контролювати якість ядерного палива. Тобто необхідно дуже точно і достовірно знати кількість і просторовий розподіл U-235 і U-238. Таким чином, перш ніж паливні стрижні залишать завод з виробництва ядерного палива, вони проходять заключну перевірку, в ході якої в паливному стрижні вимірюють вміст і розподіл ізотопів урану. Раніше для проведення такого виміру паливний стрижень пропускали крізь опромінювач, в якому його бомбардували тепловими нейтронами. Теплові нейтрони викликають поділ урану в паливному стрижні (хоча зі значно меншою швидкістю, ніж при роботі паливного стрижня в ядерному реакторі). Протягом наступних після поділу секунд і хвилин відбувається випускання множини гамма-променів. Відповідно, після опромінення паливний стрижень ядерного реактора пропускають крізь пристрій гамма-детектора, в якому випущені гамма-промені уловлюються і підраховуються. Кількість гамма-променів, випущених кожною секцією паливного стрижня, вказує на відносні концентрації і просторовий розподіл U-235 і U-238 в паливному стрижні. Потім на стадії випускаючого контролю перед випуском паливних стрижнів з виробничого заводу таку інформацію порівнюють з даними про конструкцію стрижня.

В цілому для сканування паливних стрижнів ядерного реактора для виявлення змін збагачення за довжиною стрижня (тобто рівномірності збагачення) можуть використовуватися системи пасивного сканування системи або системи активного сканування. Система пасивного сканування виявляє природне випромінювання ядерного палива, а система активного сканування індукує додаткове випромінювання в ядерному паливі, величина якого перевищує величину природного випромінювання, і виявляє таку додаткову радіоактивність. Раніше джерелом нейтронів в опромінювачі системи активного сканування був радіоактивний ізотоп, що природним чином випромінює нейтрони, зокрема, каліфорній-252 (Cf-252). Cf-252

випромінює нейтрони з енергетичним спектром, пікове значення якого становить приблизно 1 MeV. Там, де ймовірність виникнення реакції поділу в паливному стрижні дуже висока, нейтрони необхідно уповільнити або «уповільнити до теплової енергії», щоб знизити енергію. Для цього Cf-252 розміщують всередині блока сповільнювача (зазвичай, важкої води, графіту або поліетилену). При взаємодії з цими матеріалами нейтрони «відскакують» від ядер атомів у сповільнювачі і в результаті уповільнюються. Перш ніж звичайний нейтрон досягне рівнів теплової енергії, він буде змушений «ударятися» декілька десятків разів. У теплового нейтрона значно більше шансів бути поглинутим ядерним паливом з наступним індукуванням поділу, що призводить у кінцевому підсумку до генерування гамма-променів і вимірюваного сигналу на детекторах.

Період напіврозпаду Cf-252 становить 2,64 року, з чого випливає, що для забезпечення високого виходу нейтронів Cf-252 у пристроях активного сканування паливних стрижнів (тобто, пристроях сканування паливних стрижнів з використанням нейтронів) необхідно обов'язково замінювати приблизно кожні два роки. За останні декілька років вартість Cf-252 збільшилася більше ніж у десять разів, що призвело до цінового обмеження на використання цього ізотопу для генерування нейтронів активного сканування паливного стрижня. Виробники паливних стрижнів активно шукають альтернативні ефективні джерела нейтронів, придатні для виконання стадії випускаючого контролю якості перед випуском паливних стрижнів з заводу.

Сканування паливних стрижнів, що містять вигоряючий поглинач, являє собою досить важке завдання, коли справа доходить до визначення вмісту урану і плутонію та їх просторового розподілу. У вигоряючого поглинача дуже великий перетин поглинання теплових нейтронів, який значно перевищує перетин для індукування поділу в урані. Таким чином, при проходженні паливних стрижнів з вигоряючим поглиначем крізь опромінювач поглинальний матеріал поглинає більшість нейтронів, і в урані, що знаходиться в паливному стрижні, відбувається мінімальний поділ. В результаті на гамма-детектори надходить дуже слабкий сигнал, якого недостатньо для визначення концентрації і розподілу U-235 і U-238 в паливних таблетках.

Існує необхідність у вдосконаленій технології, в тому числі технології, пов'язаної з новим типом пристрою активного сканування паливних стрижнів, і в способі активного сканування паливних стрижнів ядерних реакторів.

Варіант здійснення, що наведений як приклад, відноситься до системи для активного сканування паливних стрижнів ядерного реактора, яка містить генератор нейтронів з електричним приводом, сповільнювач, канал для першого паливного стрижня і множину детекторів випромінювання. Генератор нейтронів містить іонне джерело, прискорювач і мішень. Сповільнювач розташований навколо генератора нейтронів і уповільнює нейтрони, що згенеровані генератором нейтронів. Канал для першого паливного стрижня знаходиться всередині сповільнювача. У канал для першого паливного стрижня вводять перший паливний стрижень ядерного реактора і впливають на перший паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів з заданими параметрами. Нейтрони індукують вторинне випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію, яке виявляється множиною детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, в першому паливному стрижні ядерного реактора і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною першого паливного стрижня ядерного реактора.

Відповідно до наведеного як приклад варіанта здійснення, описаного вище, сповільнювач може містити камеру, розташовану навколо мішені, нейтронний сповільнювач, що розташований навколо камери, і додатковий сповільнювач нейтронів, що розташований навколо сповільнювача нейтронів. Мішень може являти собою тверду мішень, що складається з матеріалу, який піддається самовбиранню дейтерію або тритію. Сповільнювач нейтронів, що розташований навколо камери, може бути виконаний з графіту, а додатковий сповільнювач нейтронів може бути виконаний з поліетилену борованого 5% бору. Канал для першого паливного стрижня може бути виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора, що містить уран, плутоній або їх комбінацію. Паливний стрижень ядерного реактора може містити, а може не містити вигоряючий поглинач, такий як гадоліній або бор. Канал для першого паливного стрижня може містити внутрішню оболонку, зовнішній шар якої складається з вигоряючого поглинача, такого як гадоліній або бор, і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів.

Відповідно до наведеного як приклад варіанта здійснення, описаного вище, може бути наданий щонайменше один додатковий канал для паливного стрижня (наприклад, канал для другого паливного стрижня, канал для третього паливного стрижня, канал для четвертого паливного стрижня, канал для п'ятого паливного стрижня, канал для шостого паливного стрижня, канал для сьомого паливного стрижня, канал для восьмого паливного стрижня і т. д.),

що виконаний з можливістю введення в нього уранового або плутонієвого паливного стрижня ядерного реактора, який не містить вигоряючий поглинач. Щонайменше один додатковий канал для паливного стрижня може містити внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої складається з алюмінію, а внутрішній шар якої складається з поліетилену.

Інший наведений як приклад варіант здійснення відноситься до способу активного сканування паливного стрижня ядерного реактора. Спосіб передбачає генерування нейтронів генератором нейтронів з електричним приводом, що містить іонне джерело, прискорювач і мішень; уповільнення нейтронів сповільнювачем, розташованим навколо генератора нейтронів; розміщення паливного стрижня ядерного реактора в каналі для першого паливного стрижня, розташованому в сповільнювачі; вплив на паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів із заданими параметрами для індукування допоміжного випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх комбінації; і виявлення допоміжного випромінювання множиною детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня ядерного реактора. Паливний стрижень ядерного реактора може містити, а може не містити вигоряючий поглинач, такий як гадоліній або бор.

Наведений як приклад варіант здійснення способу активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, як описано вище, може додатково включати розміщення щонайменше одного додаткового паливного стрижня ядерного реактора, який не містить вигоряючий поглинач, у щонайменше одному додатковому каналі для паливного стрижня; вплив на щонайменше один паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів із заданими параметрами для індукування допоміжного випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів і/або нейтронного випромінювання; і виявлення миттєвих і запізнілих гамма-променів і/або нейтронного випромінювання з щонайменше одного паливного стрижня ядерного реактора щонайменше одним з множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною щонайменше одного паливного стрижня ядерного реактора.

Відповідно до деяких варіантів здійснення в даному документі пропонуються системи для активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, причому система містить один або декілька з кожного з наступних пристроїв: генератор нейтронів з електричним приводом, що містить іонне джерело, прискорювач і мішень; сповільнювач, що розташований навколо генератора нейтронів і виконаний з можливістю уповільнення нейтронів, згенерованих генератором нейтронів; канал для першого паливного стрижня, що розташований у сповільнювачі, канал для першого паливного стрижня, що виконаний з можливістю розміщення в ньому першого паливного стрижня ядерного реактора і впливу на перший паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів із заданими параметрами; і множина детекторів випромінювання. Відповідно до деяких варіантів здійснення система виконана таким чином, що при використанні нейтрони індукують вторинне випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію, яке виявляється множиною детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, в першому паливному стрижні ядерного реактора і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною першого паливного стрижня ядерного реактора.

Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому першого паливного стрижня ядерного реактора, що містить вигоряючий поглинач. Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, зовнішній шар якої складається з вигоряючого поглинача і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів. Відповідно до деяких варіантів здійснення внутрішня надтеплова оболонка додатково містить внутрішній шар, що виконаний з можливістю розсіювання швидких нейтронів у надтепловій області, причому внутрішній шар розташований концентрично відносно зовнішнього шару. Відповідно до деяких варіантів здійснення внутрішній шар складається з берилію. Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому першого паливного стрижня ядерного реактора, що містить гадоліній або бор.

Відповідно до деяких варіантів здійснення системи потік нейтронів із заданими параметрами являє собою потік надтеплових нейтронів, причому надтеплові нейтрони індукують допоміжне випромінювання, яке виявляється множиною детекторів випромінювання.

Відповідно до деяких варіантів здійснення іонне джерело являє собою мікрохвильове іонне джерело або іонне джерело на основі електронного циклотронного резонансу (ЕЦР).

Відповідно до деяких варіантів здійснення мішень являє собою тверду мішень, що складається з щонайменше одного з титану, міді, цирконію, урану, паладію або алюмінію.

Відповідно до деяких варіантів здійснення сповільнювач містить камеру, розташовану навколо мішені, сповільнювач нейтронів, що розташований навколо камери, і додатковий сповільнювач нейтронів, що розташований навколо сповільнювача нейтронів. Відповідно до деяких варіантів здійснення камера містить твердий, рідкий або газоподібний діелектрик.

Відповідно до деяких варіантів здійснення камера містить рідину Fluorinert. Відповідно до деяких варіантів здійснення сповільнювач нейтронів, що розташований навколо камери, складається з графіту, D_2O або поліетилену. Відповідно до деяких варіантів здійснення додатковий сповільнювач нейтронів складається з поліетилену. Відповідно до деяких варіантів здійснення додатковий сповільнювач нейтронів складається з поліетилену з вмістом бору 5 %.

Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, зовнішній шар якої складається з вигоряючого поглинача і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів.

Відповідно до деяких варіантів здійснення системи додатково містять канал для другого паливного стрижня, що виконаний з можливістю розміщення в ньому другого паливного стрижня ядерного реактора і впливу на другий паливний стрижень ядерного реактора потоком теплових нейтронів із заданими параметрами. Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для другого паливного стрижня розташований у сповільнювачі, причому теплові нейтрони індукують допоміжне випромінювання гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію у другому паливному стрижні ядерного реактора, яке виявляється щонайменше одним з множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною другого паливного стрижня ядерного реактора. Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої складається з алюмінію, а внутрішній шар якої складається з поліетилену.

Відповідно до деяких варіантів здійснення системи додатково містять щонайменше один додатковий канал для паливного стрижня, що виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора і впливу на паливний стрижень ядерного реактора потоком надтеплових нейтронів або потоком теплових нейтронів. Відповідно до деяких варіантів здійснення нейтрони з потоку надтеплових нейтронів або потоку теплових нейтронів індукують в паливному стрижні ядерного реактора допоміжне випромінювання гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію, яке виявляється щонайменше одним із множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня ядерного реактора.

Відповідно до деяких варіантів здійснення мішень являє собою тверду мішень, що складається з титану; сповільнювач нейтронів складається з графіту; додатковий сповільнювач нейтронів складається з борованого поліетилену; канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, зовнішній шар якої складається з гадолінію і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів, і внутрішній шар якої складається з берилію і виконаний з можливістю розсіювання швидких нейтронів у надтепловій області енергій; канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора, що містить гадоліній; канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої складається з алюмінію, і внутрішній шар якої складається з поліетилену; і/або канал для другого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора, який не містить вигоряючий поглинач.

Відповідно до деяких варіантів здійснення мішень являє собою тверду мішень, яка складається з титану; сповільнювач нейтронів складається з графіту; додатковий сповільнювач нейтронів складається з борованого поліетилену; канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, зовнішній шар якої складається з бору і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів, і внутрішній шар якої складається з берилію і виконаний з можливістю розсіювання швидких нейтронів у надтепловій області енергій; канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора, що містить бор; канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої складається з алюмінію, і внутрішній шар якої складається з поліетилену; і/або канал для другого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня ядерного реактора, який не містить вигоряючий поглинач.

У даному документі також описується застосування вищезазначених систем. Відповідно до деяких варіантів здійснення застосування передбачає застосування системи для аналізу паливного стрижня ядерного реактора.

Відповідно до деяких варіантів здійснення в даному документі пропонуються способи активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, причому способи передбачають одне або більше з кожної з наступних стадій: генерування нейтронів генератором нейтронів з електричним приводом, що містить іонне джерело, прискорювач і мішень; уповільнення нейтронів сповільнювачем, розташованим навколо генератора нейтронів; розміщення паливного стрижня ядерного реактора в каналі для першого паливного стрижня, розташованому у сповільнювачі; вплив на перший паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів із заданими параметрами для індукування допоміжного випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх комбінації; і виявлення допоміжного випромінювання множиною детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня ядерного реактора. Відповідно до деяких варіантів здійснення перший паливний стрижень ядерного реактора містить вигоряючий поглинач. Відповідно до деяких варіантів здійснення перший паливний стрижень ядерного реактора містить гадоліній або бор. Відповідно до деяких варіантів здійснення потік нейтронів із заданими параметрами являє собою потік надтеплових нейтронів, причому надтеплові нейтрони індукують допоміжне випромінювання, що виявляється множиною детекторів випромінювання. Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, шар якої складається з вигоряючого поглинача; причому вплив на перший паливний стрижень ядерного реактора потоком нейтронів із заданими параметрами передбачає поглинання теплових нейтронів зовнішнім шаром внутрішньої надтеплової оболонки. Відповідно до деяких варіантів здійснення способи додатково передбачають розсіювання швидких нейтронів у надтепловій області енергій у внутрішньому шарі внутрішньої надтеплової оболонки. Відповідно до деяких варіантів здійснення способи додатково передбачають розміщення другого паливного стрижня ядерного реактора, який не містить вигоряючий поглинач, у каналі для другого паливного стрижня; вплив на другий паливний стрижень ядерного реактора потоком теплових нейтронів із заданими властивостями для індукування допоміжного випромінювання гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх комбінації; і виявлення допоміжного випромінювання другого паливного стрижня ядерного реактора щонайменше одним з множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною другого паливного стрижня ядерного реактора. Відповідно до деяких варіантів здійснення канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої складається з алюмінію, і внутрішній шар якої складається з поліетилену, причому способи додатково передбачають зменшення щільності надтеплових нейтронів за допомогою внутрішнього шару і зовнішнього шару внутрішньої теплової оболонки. Відповідно до деяких варіантів здійснення способи додатково передбачають: розміщення паливного стрижня ядерного реактора, який не містить вигоряючий поглинач, у щонайменше одному додатковому каналі для паливного стрижня; вплив на паливний стрижень ядерного реактора потоком надтеплових нейтронів із заданими властивостями або потоком теплових нейтронів для індукування допоміжного випромінювання гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх комбінації; і виявлення допоміжного випромінювання паливного стрижня ядерного реактора щонайменше іншим із множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня ядерного реактора. Відповідно до деяких варіантів здійснення мішень являє собою тверду мішень, що містить атоми дейтерію, і причому генерування нейтронів генератором нейтронів з електричним приводом передбачає обстріл твердої мішені пучком прискорених іонів дейтерію для генерування нейтронів за рахунок термоядерної реакції дейтерію з дейтерієм. Відповідно до деяких варіантів здійснення способи додатково передбачають заповнення атомів дейтерію, що містяться в твердій мішені, за рахунок опромінення твердої мішені пучком прискорених іонів дейтерію. Відповідно до деяких варіантів здійснення тверда мішень складається з щонайменше одного титану, міді, цирконію, урану, паладію або алюмінію. Відповідно до деяких варіантів здійснення сповільнювач містить камеру, розташовану навколо мішені, сповільнювач нейтронів, що розташований навколо камери, і додатковий сповільнювач нейтронів, що розташований навколо сповільнювача нейтронів, причому уповільнення нейтронів сповільнювачем передбачає використання сповільнювача нейтронів для уповільнення до теплової швидкості нейтронів, згенерованих генератором нейтронів з електричним приводом, і поглинання уповільнених до теплової швидкості нейтронів додатковим сповільнювачем нейтронів. Відповідно до деяких варіантів здійснення сповільнювач нейтронів, що розташований навколо камери, складається з графіту, D₂O або поліетилену, і додатковий

сповільнювач нейтронів складається з поліетилену. Відповідно до деяких варіантів здійснення камера містить твердий, рідкий або газоподібний діелектрик. Відповідно до деяких варіантів здійснення камера являє собою камеру Fluorinert, що містить рідину Fluorinert.

Додаткові ознаки, переваги і варіанти здійснення даного винаходу можуть бути виведені виходячи з розгляду наступного докладного опису, фігур і формули винаходу. Більше того, слід розуміти, що як наведений вище короткий опис даного винаходу, так і подальше докладне розкриття даного винаходу наведені як приклад і призначені для додатково пояснення без обмеження обсягу, який заявляється, даного винаходу.

Фігури, які додаються, що призначені для додаткового пояснення даного винаходу, становлять частину даного опису, а також ілюструють варіанти здійснення даного винаходу і разом з докладним описом допомагають викласти його основні ідеї. Конструктивні деталі даного винаходу не показані докладніше, ніж це може бути необхідно для принципового розуміння даного винаходу і різних способів його практичної реалізації.

На фіг. 1 показаний вертикальний поперечний переріз генератора нейтронів і сповільнювача системи для генерування нейтронів за рахунок термоядерної реакції дейтерію з дейтерієм (DD) і активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, що містить вигоряючий поглинач.

На фіг. 2 показаний вертикальний поперечний переріз генератора нейтронів, зображеного на фіг. 1.

На фіг. 3 показаний вертикальний поперечний переріз сповільнювача, зображеного на фіг. 1, на якому зображений канал для першого паливного стрижня, канал для другого паливного стрижня і канал для третього паливного стрижня.

На фіг. 4 показаний горизонтальний поперечний переріз сповільнювача, зображеного на фіг. 1, з розрізом крізь ділянки каналу для паливного стрижня, зображеного на фіг. 3.

На фіг. 5 показаний вертикальний поперечний переріз центрального каналу для паливного стрижня, зображеного на фіг. 3, в який введений паливний стрижень, що містить вигоряючий поглинач. Центральний канал для паливного стрижня може являти собою надтепловий канал для паливного стрижня.

На фіг. 6 показаний вертикальний поперечний переріз одного з каналу для другого паливного стрижня і каналу для третього паливного стрижня (тобто каналів для паливного стрижня, розташованих з будь-якої сторони центрального каналу для паливного стрижня), зображених на фіг. 3, в який введений паливний стрижень, що не містить вигоряючий поглинач.

На фіг. 7 показана картограма потоку теплових нейтронів із накладеним виглядом у поперечному перерізі сповільнювача, зображеного на фіг. 3.

На фіг. 8 показана картограма потоку теплових нейтронів із накладеним виглядом у поперечному перерізі сповільнювача, зображеного на фіг. 4.

На фіг. 9 представлено порівняння перетину поглинання Gd-157, а також загальні перетини поділу U-235 і U-238.

На фіг. 10 показаний графік, що демонструє енергетичний спектр нейтронів, який одержаний модулюванням MCNP на ділянці центрального каналу для паливного стрижня, зображеного на фіг. 3.

На фіг. 11 показана картограма потоку надтеплових нейтронів із накладеним виглядом у поперечному перерізі сповільнювача, зображеного на фіг. 3.

На фіг. 12 показана картограма потоку швидких нейтронів із накладеним виглядом у поперечному перерізі сповільнювача, зображеного на фіг. 3.

На фіг. 13 показаний вигляд зверху системи активного сканування, яка містить генератор нейтронів і сповільнювач, що зображені на фіг. 2 і 3 відповідно. Комп'ютери (не зображені), що використовуються для керування системою активного сканування, віддалено розташовані в пункті керування скануванням (не зображений).

На фіг. 14 показаний вигляд зверху системи активного сканування, яка показана на фіг. 13, що містить резервний опромінювач і апаратне забезпечення для переміщення стрижня.

На фіг. 15 показаний вигляд у перспективі системи активного сканування, зображеної на фіг. 13, на якому зазначені області для ручного введення паливного стрижня й автоматизованого виведення паливного стрижня.

На фіг. 16 показаний інший вигляд у перспективі системи активного сканування, зображеного на фіг. 13, який збільшений для демонстрації деталей ручного введення паливного стрижня, показаного на фіг. 15.

На фіг. 17 показаний ще один вигляд у перспективі системи активного сканування, зображеної на фіг. 13, який збільшений для демонстрації деталей автоматизованого виведення паливного стрижня, показаного на фіг. 15.

Перед тим, як звернутися до фігур, на яких детально зображені наведені як приклад

варіанти здійснення, слід розуміти, що даний винахід не обмежується деталями або способами, викладеними в описі або показаними на фігурах. Також слід розуміти, що терміни наведені в описових цілях і не повинні розглядатися як обмежуючі. На фігурах однакові або подібні позначення позицій використовуються для однакових або подібних деталей.

5 Як описано вище, в традиційному способі активного сканування паливних стрижнів як джерела нейтронів використовують каліфорній-252 (Cf-252). Як показано на фігурах у цілому, в системі 100, описаній у варіантах здійснення нижче, джерело нейтронів Cf-252 замінене генератором 10 нейтронів з електричним приводом, що буде докладно описано нижче з посиланням на варіанти здійснення. Використання генератора нейтронів з електричним
10 приводом замість радіоактивного ізотопу має множину переваг, включаючи усунення необхідності в частій заміні/заповненні Cf-252 і можливість вимикати джерело нейтронів, коли воно не використовується, підтримуючи при цьому високі швидкості сканування і високу точність, пов'язану з активними сканерами на основі Cf-252.

Як показано на фіг. 1, система 100 для генерування нейтронів за рахунок термоядерної реакції дейтерію з дейтерієм (DD) і активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, що містить вигоряючий поглинач, містить генератор 10 нейтронів і сповільнювач 20. Для активного сканування генератор 10 нейтронів виконаний з можливістю бомбардування ядерного палива в паливному стрижні нейтронами, тим самим індукуючи допоміжне випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів і/або нейтронне випромінювання, а також
20 випромінювання миттєвих і запізнілих теплових, надтеплових або швидких нейтронів. Це допоміжне випромінювання потім оцінюють кількісно для визначення вмісту речовини, що поділяється, і рівня збагачення за довжиною паливного стрижня (тобто просторового розподілу вмісту речовини, що поділяється). Таким чином, можуть бути виявлені зміни збагачення за довжиною паливного стрижня.

На фіг. 2 показаний поперечний переріз одного варіанта здійснення генератора 10 нейтронів. Відповідно до одного варіанта здійснення генератор 10 нейтронів містить іонне джерело 11, прискорювач 12, пучок 13 іонів дейтерію, вакуумні насоси 14 і тверду мішень 15. Генератор 10 нейтронів (що описаний нижче) виконаний з можливістю генерування до $2,5 \times 10^{10}$ DD-нейтронів/с на основі максимальної робочої напруги 200 кВ і максимального
30 робочого струму пучка 45 мА. Номінальна робоча точка для системи становить приблизно 155 кВ і 40 мА, що забезпечує загальний вихід нейтронів, який дорівнює 1×10^{10} DD-нейтронів/с.

Іонне джерело 11 створює щільну дейтерієву плазму. Іонне джерело 11 може являти собою, наприклад, мікрохвильове іонне джерело або іонне джерело на основі електронного циклотронного резонансу (ЕЦР). Відповідно до деяких варіантів здійснення в іонному джерелі 11 відсутні компоненти одноразового використання, воно генерує струм іонного пуску дуже високої щільності (наприклад, 200 мА/см²), а також характеризується дуже тривалою кампанією (наприклад, декілька років).
35

Відповідно до одного прикладу, згідно з яким іонне джерело 11 створює щільну дейтерієву плазму, дейтерієвий газ безперервно подається в плазмову камеру 11а іонного джерела 11. У плазмовій камері 11а за допомогою двох магнітів 11b наводиться магнітне поле, наприклад, магнітне поле величиною $875 \text{ Г} \pm 20\%$. Магніти 11b можуть являти собою, наприклад, соленоїдні електромагніти або постійні магніти. Мікрохвилі з частотою, наприклад, $2,45 \text{ ГГц} \pm 20\%$, що створені магнетроном (не показаний), передаються у плазмову камеру 11а за коаксіальним кабелем і хвилеводом 11с, генеруючи щільну дейтерієву плазму. Як хвилевід 11с може використовуватися будь-який відомий хвилевід, наприклад, хвилевід, що описаний в документі WO/2015006065, зміст якого, включаючи аспекти, які відносяться до конструкції і застосування хвилеводів у генераторах нейтронів, включений у всій повноті у даний документ за допомогою посилання.
45

Іони дейтерію витягуються з іонного джерела 11 у вигляді пучка 13 іонів дейтерію і за допомогою прискорювача 12 прискорюються. Зокрема, позитивні іони дейтерію виводяться з плазмової камери 11а (потенціал землі) за рахунок електростатичного потенціалу, присутнього між отвором плазмової камери для випромінювання й електродом, що виводить, (наприклад, при потенціалі, якій дорівнює -40 кВ). Потім виведений пучок 13 іонів дейтерію прискорюється до повної напруги (наприклад, від 150 кВ до 200 кВ) за допомогою електростатичного потенціалу, присутнього в прискорювачі 12.
50

За допомогою вакуумних насосів 14 під час роботи підтримують низький тиск всередині прискорювача 12, який підвищує стійкість і вихід нейтронів. Вакуумні насоси 14 можуть входити в склад системи диференціальної накачки, призначеної для підтримки першого перепаду тиску між зовнішньою атмосферою й областю іонного джерела/прискорювача, другого перепаду тиску між зовнішньою атмосферою і мішенню і третього перепаду тиску між областю іонного
60

джерела/прискорювача і мішенню. Приклади такої системи диференціальної накачки описані в документах WO/2009142669 і WO/2011081940, зміст яких, включаючи аспекти, що пов'язані з конструкцією і застосуванням систем диференціальної накачки в генераторах нейтронів, включений у даний документ за допомогою посилання.

Пучок іонів дейтерію (що характеризується високими значеннями напруги і струму) рухається у вакуумі і в кінцевому підсумку ударяється об інші атоми дейтерію, що містяться в твердій мішені 15. Незважаючи на те, що тверда мішень може виробляти менше нейтронів, ніж газоподібна мішень, використання саме твердої мішені дозволяє зменшити розмір і вартість системи в порівнянні з системою, в якій використовується газоподібна мішень. Тверда мішень 15 може являти собою, наприклад, самовбираючу мішень, виконану з одного або декількох матеріалів, які утримуються за водень, так що пучок іонів може вводити іони дейтерію або тритію в мішень, що служать «паливом» для виробництва нейтронів. Як приклади таких матеріалів можна назвати титан, мідь, цирконій, уран, паладій і алюміній. Незважаючи на те, що може бути використана попередньо заповнена мішень, що містить дейтерій або тритій, після витрачання дейтерію або тритію мішень необхідно замінити. Таким чином, переважно використовувати самовбираючу мішень, яку за допомогою пучка іонів можна «заповнювати» дейтерієм або тритієм для продовження терміну служби мішені. Відповідно до переважних варіантів здійснення тверда мішень 15 може являти собою титанову мішень, мідну мішень або самовбираючу титанову і мідну мішень.

Згенеровані нейтрони характеризуються середнім значенням пікової енергії, що дорівнює приблизно 2,5 MeV. Вихід нейтронів є анізотропним з піком у прямому напрямку. Реакція із спрямованими вперед піками має сприятливі ефекти, які полягають у збільшенні теплового потоку в паливних стрижнях відносно істинно ізотропної реакції. Невелика частка падаючих іонів запускає в твердій мішені 15 термоядерну реакцію дейтерій-дейтерій. При взаємодії високоенергетичних дейтронів виникають термоядерні реакції, в результаті яких утворюються високоенергетичні нейтрони. Такі швидкі нейтрони, які випущені з твердої мішені 15, багаторазово взаємодіють із сповільнювачем 20, розташованим навколо, значно знижуючи середню енергію щільності нейтронів.

Мішень 15 знаходиться під високою напругою, тому охолоджуюча сорочка, що розташована навколо мішені 15, повинна мати достатню товщину і повинна містити електричний ізоляційний матеріал, який також виступає як холодоагент. Крім того, ізоляційний матеріал бере участь в уповільненні нейтронів, при цьому він не має високої здатності поглинати теплові нейтрони. Вибраний ізоляційний матеріал Fluorinert (буде описаний нижче), який являє собою електричний ізоляційний матеріал, що здатний уповільнювати нейтрони, при цьому не поглинаючи нейтрони з низькою енергією. Відведення тепла від мішені 15, яка виробляє нейтрони, здійснюється за допомогою циркулюючої рідини Fluorinert, розташованої навколо мішені 15 і прискорювача 12, і в кінцевому підсумку повністю тепло відводиться із системи за допомогою теплообмінника (не показаний).

На фіг. 3 показаний поперечний переріз одного варіанта здійснення сповільнювача 20. Навколо твердої мішені 15 знаходиться камера 21, яка виступає як електроізоляційний матеріал для твердої мішені 15, що знаходиться під високою напругою, а також вихідного сповільнювача нейтронів. Камера 21 може містити твердий, рідкий або газоподібний діелектрик. Наприклад, камера 21 може являти собою камеру Fluorinert, що містить рідину Fluorinert. Відповідно до інших прикладів камера 21 може містити олію або гексафторид сірки. Навколо камери 21 розташований сповільнювач 22 нейтронів. Сповільнювач 22 нейтронів може бути виконаний, наприклад, з поліетилену, водонаповненого поліетилену (WEP), поліетилену високої щільності (HDPE), графіту, D₂O (важкої води), води або їх комбінації. У прикладі, показаному на фіг. 3, сповільнювач 22 нейтронів являє собою графітову камеру. Графіт відомий своїм дуже маленьким перетином захоплення нейтронів, тому він ідеально підходить для досягнення низьких значень енергії (наприклад, менше 0,025 eV) з високою ефективністю. Сповільнювач 20 також містить додатковий сповільнювач нейтронів 23. Додатковим сповільнювачем нейтронів 23 може бути, наприклад, будь-який матеріал, у тому числі форма поліетилену, така як поліетилен високої щільності (HDPE). Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 3, матеріал, що розташований навколо, являє собою зону відтворення з поліетилену високої щільності (HDPE) з додаванням 5% бору, яка сприяє уповільненню до теплової енергії і захопленню нейтронів, які не потрапили в область уповільнення (тобто камеру 21 і сповільнювач 22 нейтронів), щоб зберегти нейтронну дозу за межами системи на безпечному рівні. На фіг. 3 показана основа додаткового сповільнювача нейтронів 23, що розташована на бетоні, а інші сторони додаткового сповільнювача нейтронів 23, як показано, контактують з атмосферою (тобто повітрям).

На фіг. 3 також показані три канали для паливних стрижнів: канал 30 для першого паливного стрижня, канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня. Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 3, кожний з каналів 30, 40 і 50 для паливних стрижнів розташований всередині сповільнювача 22 нейтронів. Однак даний винахід не обмежується таким варіантом здійснення. Відповідно до інших прикладів канал 30 для першого паливного стрижня, канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня можуть бути розташовані в різних місцях. Наприклад, канал 30 для першого паливного стрижня, канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня можуть бути розташовані всередині камери 21; два канали з каналу 30 для першого паливного стрижня, каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня можуть бути розташовані всередині камери 21, тоді як канал для паливного стрижня, що залишився, буде розташований у сповільнювачі 22 нейтронів; або два канали з каналу 30 для першого паливного стрижня, каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня можуть бути розташовані всередині сповільнювача 22 нейтронів, тоді як канал для паливного стрижня, що залишився, буде розташований в камері 21.

Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 3, канал 30 для першого паливного стрижня розташований по суті на тій самій висоті, що й канал 40 для другого паливного стрижня, і канал 50 для третього паливного стрижня. Даний винахід не обмежується таким варіантом здійснення. Відповідно до інших прикладів канал 30 для першого паливного стрижня може бути розташований вище, ніж канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня, так що канал 30 для першого паливного стрижня буде знаходитися ближче до твердої мішені 15, ніж канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня. Канал 30 для першого паливного стрижня, канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня можуть бути розташовані на різних висотах відносно один одного. Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 3, канал 30 для першого паливного стрижня рівновіддалений від каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня (наприклад, посередині між каналом 40 для другого паливного стрижня і каналом 50 для третього паливного стрижня, хоча і на іншій висоті). Відповідно до інших прикладів канал 30 для першого паливного стрижня може бути розташований ближче до каналу 40 для другого паливного стрижня, ніж канал 50 для третього паливного стрижня, або ж канал 30 для першого паливного стрижня може бути розташований ближче до каналу 50 для третього паливного стрижня, ніж канал 40 для другого паливного стрижня. Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 3, канал 30 для першого паливного стрижня, канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня розташовані на однаковій висоті і паралельно один одному. На фіг. 4, показані паралельні канал 30 для першого паливного стрижня, канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня, якщо дивитися зверху поперечного перерізу сповільнювача 20.

Незважаючи на те, що на фіг. 3 показані три канали для паливного стрижня, згідно з іншими варіантами здійснення може використовуватися інша кількість каналів для паливних стрижнів (наприклад, один, два, чотири, п'ять і т. д.). Відповідно до деяких варіантів здійснення в камері 21 може бути надана множина каналів для паливних стрижнів. Відповідно до деяких варіантів здійснення у сповільнювачі 22 нейтронів може бути наданий єдиний канал для паливного стрижня.

Канал 30 для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому знімної порожнистої оболонки 31, призначеної для активного тестування паливних стрижнів. Як оболонка 31 може використовуватися, наприклад, надтеплова оболонка, що призначена для активного тестування паливних стрижнів з надтепловими нейтронами. Потік нейтронів із заданими параметрами (тобто надтепловий або тепловий) в каналі 30 для першого паливного стрижня становить приблизно від $1\text{E}4$ нейтронів/см²/с до $1\text{E}8$ нейтронів/см²/с, наприклад, $1,38\text{E}6$ нейтронів/см²/с.

На фіг. 5 відповідно до одного варіанта здійснення показана оболонка 31, що містить зовнішній шар 31a, який складається з вигоряючого поглиначя (наприклад, гадолінію, бору і т. д.) або іншого поглиначя теплових нейтронів і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів, і внутрішній шар 31b, що виконаний з можливістю розсіювання швидких нейтронів у надтепловій або тепловій області енергії. Внутрішній шар 31b може бути виконаний, наприклад, з берилію, поліетилену, графіту або важкої води. Внутрішній шар 31b виконаний співвісно по відношенню до зовнішнього шару 31a. Відповідно до інших варіантів здійснення внутрішній шар 31b може бути відсутній. Оболонка 31 може додатково містити алюмінієву оболонку 33. Оболонка 31 виконана співвісно по відношенню до алюмінієвої оболонки 33. Оболонка 31 виконана з можливістю розміщення в ній паливного стрижня 32. Паливний стрижень 32 може

містити, а може не містити вигоряючий поглинач, такий як гадоліній або бор. Для цілей даного винаходу в прикладах, які будуть описані нижче, мова йде про уранові паливні стрижні, що містять гадоліній, однак фахівцю в галузі техніки даного винаходу має бути зрозуміло, що система і способи також можуть використовуватися для активної перевірки паливних стрижнів ядерного реактора, що містять уран, плутоній або їх комбінацію і не містять вигоряючий поглинач; паливних стрижнів ядерного реактора, що містять плутоній або комбінацію урану і плутонію, а також містять гадоліній; або паливних стрижнів ядерного реактора, що містять уран, плутоній або їх комбінацію, а також містять інший вигоряючий поглинач, такий як бор. Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 5, паливний стрижень 32 являє собою урановий паливний стрижень, що містить гадоліній (тобто паливний стрижень $GdUO_2$). Паливний стрижень 32 може містити зовнішню оболонку 32a, наприклад, цирконієву оболонку. Зовнішня оболонка 32a виконана з можливістю розміщення в ній паливних таблеток. Між зовнішньою оболонкою 32a і внутрішнім шаром 31b присутній невеликий проміжок. Зовнішня оболонка 32a заповнена, зазвичай, гелієм.

В цьому прикладі канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня виконані з можливістю розміщення в їх порожнистій тепловій оболонці 60, призначеній для активної перевірки стандартних паливних стрижнів (тобто паливних стрижнів без вигоряючого поглинача) з використанням надтеплових або теплових нейтронів. На фіг. 6 відповідно до одного варіанта здійснення показана тепла оболонка 60, що містить зовнішній шар 61, який виконаний, наприклад, з алюмінію, і внутрішній шар 62, який виконаний, наприклад, з HDPE. Внутрішній шар 62 (наприклад, зона виробництва з HDPE) виконаний співвідносно по відношенню до зовнішнього шару 61 (наприклад, алюмінієвої оболонки). Теплова оболонка 60 виконана з можливістю розміщення в ній стандартного паливного стрижня 63, наприклад паливного стрижня з U-235 або U-238 (тобто паливного стрижня UO_2). Паливний стрижень 63 може містити зовнішню оболонку 63a, наприклад, цирконієву оболонку. Зовнішня оболонка 63a виконана з можливістю розміщення в ній паливних таблеток. Між зовнішньою оболонкою 63a і внутрішнім шаром 62 присутній невеликий зазор. Зовнішня оболонка 63a заповнена, зазвичай, гелієм. Паливний стрижень 63 не містить вигоряючий поглинач.

Потік нейтронів із заданими параметрами (тобто надтепловий або тепловий) в каналах для другого і для третього паливного стрижня, 40 і 50, становить приблизно від $1E4$ нейтронів/см²/с до $1E8$ нейтронів/см²/с, наприклад, $1,38E6$ нейтронів/см²/с, у конфігурації, в якій і канал 40 для другого паливного стрижня, і канал 50 для третього паливного стрижня містять паливний стрижень 63. Система також була випробувана в конфігурації, в якій один з каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня є порожнім, а другий з каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня містить паливний стрижень 63. Тепловий потік, що поданий в паливний стрижень 63, був таким самим, як і у випадку з паливними стрижнями 63 в каналі 40 для другого паливного стрижня, і каналі 50 для третього паливного стрижня з невизначеністю до 0,1%. Тому канал 40 для другого паливного стрижня і канал 50 для третього паливного стрижня роз'єднані, а наявність або відсутність палива в одному з каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня не впливає на нейтронно-фізичні характеристики іншого каналу.

На фіг. 7 і 8 показаний потік теплових нейтронів ($E < 0,025$ eV) у тих самих площинах, що і на фіг. 3 і 4, відповідно. На фіг. 7 і 8 показано, що сповільнювач 22 нейтронів (тобто графітова камера) виконаний з можливістю виробництва високооднорідного середовища теплових нейтронів для каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня. В результаті паливні стрижні 63 можуть довше знаходитися в областях з піковою щільністю теплових нейтронів (приблизно 30 см), тим самим, підсилюючи активацію в паливі та скорочуючи час виявлення. За допомогою програм моделювання MCNP було встановлено, що конфігурація відповідно до варіантів здійснення даного винаходу дозволяє створити високорівномірну область теплових нейтронів з великим потоком теплових нейтронів приблизно від $1E4$ нейтронів/см²/с до $1E8$ нейтронів/см²/с, наприклад, $1,38E6$ нейтронів/см²/с, призводячи до покращеної активації нейтронів у паливних стрижнях.

На фіг. 9 наведені результати порівняння перетинів поглинання $Gd-157$, U-235 і U-238 з енергетичним спектром нейтронів. Як видно на фіг. 9, для надтеплової енергії (тобто енергії вище енергії теплових нейтронів і нижче енергії швидких нейтронів), перетин поділу U-235 і перетин поглинання в $Gd-157$ приблизно однакові. Звідси випливає, що канал 30 для першого паливного стрижня для сканування паливного стрижня 32, що містить гадоліній, має оптимальні параметри для нейтронів вище області теплової енергії. Це досягається, наприклад, за рахунок виконання внутрішнього шару 31b з берилію і зовнішнього шару 31a з гадолінію навколо паливного стрижня 32, створюючи таким чином ефективний бар'єр для теплових нейтронів. На

картограмі потоку теплових нейтронів, показаній на фіг. 7, видно, що щільність теплових нейтронів у каналі 30 для першого паливного стрижня істотно зменшена. З огляду на те, що канал 30 для першого паливного стрижня розташований ближче до джерела швидких нейтронів, загальна щільність нейтронів вище, ніж у каналі 40 для другого паливного стрижня і каналі 50 для третього паливного стрижня. Відповідно, попри те, що перетин поділу для надтеплових нейтронів значно менше перетину поділу для теплових нейтронів, щільність нейтронів для індуквання таких реакцій поділу значно більше. Результати моделювання за допомогою програм MCNP вказують, що активність паливних стрижнів 32 (що містять гадоліній), які виходять з каналу 30 для першого паливного стрижня, дорівнює приблизно половині активності стандартних паливних стрижнів 63, які виходять з каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня. Отже, відповідно до щонайменше одного варіанта здійснення даного винаходу в каналі 30 для першого паливного стрижня може бути розташовано вдвічі більше гамма-детекторів, ніж у каналі 40 для другого паливного стрижня і каналі 50 для третього паливного стрижня. Більш того, швидкість сканування в каналі 30 для першого паливного стрижня може бути нижче швидкості сканування в каналі 40 для другого паливного стрижня і каналі 50 для третього паливного стрижня. Наприклад, швидкість сканування в каналі 30 для першого паливного стрижня може дорівнювати приблизно половині швидкості сканування в каналі 40 для другого паливного стрижня і каналі 50 для третього паливного стрижня. Швидкість сканування для кожного з каналу 30 для першого паливного стрижня, каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня може знаходитися в діапазоні від 5 до 30 см/с.

При використанні для індуквання поділу надтеплових нейтронів необхідно враховувати той факт, що перетин поділу U238 для надтеплових нейтронів значно більше перетину поділу для теплових нейтронів. Відповідно, якщо основна задача полягає у вимірюванні вмісту U235, що є характерною задачею для більшості випадків, поділ U238 може являти собою значно більш ефективне джерело фонових гамма-променів. Звідси впливає верхня межа на ідеальній області енергії для нейтронів у каналі 30 для першого паливного стрижня, яка становить приблизно 1 МеВ. Тому як теплові, так і швидкі нейтрони необхідно відсівати якомога ретельніше, створюючи ефективну щільність надтеплових нейтронів у паливному стрижні 32. Для цього важливі геометричні параметри каналів 30, 40 і 50 для паливних стрижнів і вибрані матеріали. Відповідно до прикладу, показаного на фіг. 3, геометричні параметри сповільнювача 20 і матеріали, що описані з посиланням на фіг. 5 і 6, підібрані таким чином, щоб максимально збільшити щільність надтеплових нейтронів (зосереджені приблизно навколо значення ~ 1 еВ) в каналах 30, 40 і 50 для паливних стрижнів.

Канал 30 для першого паливного стрижня для сканування паливного стрижня 32, що містить гадоліній, повинний знаходитися досить далеко від джерела нейтронів, щоб зменшити щільність швидких нейтронів у потоці, що є результатом безпосереднього транспортування або одиничного розсіювання. Переважно розташовувати канал 30 для першого паливного стрижня дуже близько від максимального надтеплогового потоку й одночасно за межами області максимального потоку швидких нейтронів. Так досягається декілька більша відносна кількість поділів, індукованих у U-235, ніж в U-238, що дієво збільшує ефективність нейтронів і знижує фоновий сигнал активації U-238. На фіг. 10 показаний енергетичний спектр нейтронів, який одержаний модулюванням MCNP на ділянці каналу 30 для першого паливного стрижня, показаного на фіг. 3. Як видно на фіг. 10, високоенергетичний кінець дуже низький у порівнянні з щільністю нейтронів у надтепловій області.

У таблиці 1 представлена кількість активацій U-235 і U-238 в каналі 40 для другого паливного стрижня і каналі 50 для третього паливного стрижня (тобто в теплових каналах), а в таблиці 2 представлена кількість активацій U-235 і U-238 в каналі 30 для першого паливного стрижня (тобто в надтепловому каналі) для паливного стрижня, що містить 5% атомний природний гадоліній.

Таблиця 1.

Щільність активації U-235 і U-238 в теплових лініях

Збагачення U-235 (%)	Щільність активації U-235 (поділів/см ³ -с)	Щільність активації U-238 (поділів/см ³ -с)	Відсоток поділів від U-235
0	0,0E+00	1,2E+03	0 %
1,60	1,1E+06	1,2E+03	99,89 %
2,40	1,6E+06	1,2E+03	99,93 %
3,60	2,4E+06	1,2E+03	99,95 %
3,95	2,6E+06	1,2E+03	99,96 %
4,40	2,9E+06	1,2E+03	99,96 %
4,90	3,2E+06	1,2E+03	99,96 %

Таблиця 2

Щільність активації U-235 і U-238 в теплових лініях

Збагачення U-235 (%)	Щільність активації U-235 (поділів/см ³ -с)	Щільність активації U-238 (поділів/см ³ -с)	Відсоток поділів від U-235
0	0,0E+00	3,0E+03	0 %
1,60	3,0E+04	3,0E+03	90,97 %
2,40	4,5E+04	3,0E+03	93,72 %
3,60	6,6E+04	3,0E+03	95,62 %
3,95	7,2E+04	3,0E+03	95,98 %
4,40	7,9E+04	3,0E+03	96,34 %
4,90	8,7E+04	3,0E+03	96,67 %

Як видно з таблиці 1 (тобто за тепловими каналами 40, 50), при кожному збагаченні практично кожна подія поділу відбувається в U-235. Як видно з таблиці 2 (тобто за надтепловим каналом 30), частка поділів, що відбуваються в U-235, становить близько величини, яка перевищує частку поділів U-238, і цей рівень фону можна обчислити шляхом віднімання відомого відгуку U-238, який буде змінюватися в залежності від відсоткової частки на основі збагачення U-235 паливного стрижня.

На фіг. 11 і 12 показаний потік надтеплових нейтронів і потік швидких нейтронів, відповідно, для альтернативного варіанта здійснення сповільнювача 20, згідно з яким канали 30, 40 і 50 для паливних стрижнів розташовані на одній висоті і паралельні один одному. Відповідно до цього варіанта здійснення канал для першого паливного стрижня знаходиться між каналом 40 для другого паливного стрижня і каналом 50 для третього паливного стрижня рівновіддаленно від каналу 40 для другого паливного стрижня і каналу 50 для третього паливного стрижня. Як видно на фіг. 12, потік швидких нейтронів у каналі 30 для першого паливного стрижня значно зменшений; однак це відбувається за рахунок меншого потоку надтеплових нейтронів (див. фіг. 11). Відповідно до інших варіантів здійснення щонайменше один з каналів 30, 40 і 50 для паливних стрижнів являє собою надтепловий канал, і щонайменше один з каналів 30, 40 і 50 для паливних стрижнів являє собою тепловий канал. Один або декілька надтеплових каналів може бути розташований на такій самій висоті, вище або нижче одного або декількох теплових каналів.

Перетин для захоплення нейтронів вигоряючим поглиначем (наприклад, гадолінієм) у паливному стрижні 32 сильно зменшується із зростом енергії нейтронів. Відповідно, відсоткова частка нейтронів, поглинених поглиначем у стрижні, може бути істотно зменшена за рахунок

збільшення середньої енергії щільності нейтронів у каналах для паливних стрижнів в опромінювачі. Більш того, перетин поділу урану не зменшується так швидко, як перетин поглинання для захоплення нейтронів поглиначами при збільшенні середньої енергії нейтронів. Відповідно, завдяки оптимізації потоку надтеплових нейтронів у місцях розташування каналів

для паливного стрижня можна значно збільшити відсоткову частку нейтронів, що використовуються для індукування поділу і подачі вимірюваного сигналу на гамма-детектори. В такому методі активне детектування нейтронів можна використовувати для вимірювання вмісту і просторового розподілу речовини, що поділяється, не тільки в стандартних паливних стрижнях, але і в паливних стрижнях, які містять вигоряючий поглинач, окремо або одночасно.

Система 100, що описана вище, може бути вбудована в систему 1000 активного сканування, як показано на фіг. 13. Система 1000 активного сканування виконана з можливістю сканування стандартних паливних стрижнів (наприклад, паливних стрижнів 63 з UO_2) і паливних стрижнів, що містять вигоряючий поглинач (наприклад, паливних стрижнів 32 з GdUO_2), одним пристроєм сканування. Відповідно до одного прикладу, показаного на фіг. 15, система 1000 активного сканування виконана з можливістю ручного вводу паливних стрижнів і автоматичного виводу сканованих паливних стрижнів. На фіг. 16 і 17 показана система 1000 активного сканування, яка може містити детектори фону, щільномір, опромінювач, активаційні детектори, систему виміру з гадолінієм, апаратні засоби переміщення стрижнів і всі необхідні комп'ютери, електронне обладнання і програмне забезпечення, що необхідне для роботи системи. Детектор розміщують таким чином (див. фіг. 17), щоб миттєві гамма-промені, що створені в результаті миттєвого поділу, не впливали на вимір активації, і в розрахунок брався тільки запізнілий гамма-спектр. Відповідно, вимірюється спектр поділу урану запізнілих гамма-променів, що дає можливість визначити відсоткову частку збагачення, загальну кількість урану в грамах і будь-які відхилення в таблетках у паливному стовпі. Відповідно до деяких варіантів здійснення для виміру гамма-випромінювання стрижня перед опроміненням використовується детектор гамма-фону. Для підвищення точності та для обліку віку палива цей фон може бути врахований з сигналу запізнілих гамма-променів. Крім того, запропонований пристрій сканування вимірює запізнілі нейтрони для подальшої обробки даних про збагачення.

На фіг. 14 показана система 1000 активного сканування згідно з фіг. 13, що містить додаткові елементи: резервний опромінювач 1001 для резервування і швидкого обслуговування, а також повністю автоматизоване обладнання 1002 для переміщення стрижнів для автоматичного завантаження/розвантаження й автоматичного повернення стрижнів, які необхідно сканувати повторно. Резервний опромінювач може використовуватися для усунення небезпеки, пов'язаної з використанням єдиного генератора нейтронів, який може являти собою елемент, відмова якого призводить до відмови всієї системи. На додаток до усунення цієї небезпеки резервний опромінювач також підвищує загальну готовність пристрою сканування до роботи за рахунок зменшення часу простою, викликаного технічним обслуговуванням або ремонтом генератора нейтронів. Додаткове обладнання для переміщення стрижнів дозволить зменшити ступінь втручання оператора за рахунок автоматизації процесу навантаження і вивантаження лотка, завдяки чому оператори можуть доставляти лотки зі стрижнями для сканування в зону завантаження/вивантаження і витягувати лотки зі сканованими стрижнями з тієї самої зони. Також додаткове обладнання для переміщення стрижнів дозволить системі автоматично відправляти в карантин і потім повторно сканувати потенційні стрижні з дефектами.

Відповідно до варіантів здійснення системи активного сканування, описаних вище, детектор розміщують таким чином, щоб миттєві гамма-промені, що створені в результаті миттєвого поділу, не впливали на вимір активації, і в розрахунок брався тільки запізнілий гамма-спектр.

Незважаючи на те, що відповідно до варіантів здійснення, описаних вище, паливні стрижні ядерного реактора були описані як уранові паливні стрижні, даний винахід не обмежується таким варіантом. Відповідно до інших варіантів здійснення паливні стрижні ядерного реактора можуть являти собою плутонієві паливні стрижні або паливні стрижні, що містять уран і плутоній. Крім того, незважаючи на те, що відповідно до варіантів здійснення, описаних вище, як вигоряючий поглинач використовується гадоліній, даний винахід не обмежується таким варіантом. Відповідно до інших варіантів здійснення може використовуватися будь-який відомий вигоряючий поглинач, такий як бор.

Терміни «приблизно», «близько», «по суті», що використовуються в даній заявці, і подібні до них терміни використовуються в широкому сенсі та в звичайному загальноприйнятому значенні, зрозумілому для фахівців у галузі техніки даного винаходу. Фахівцю в галузі техніки, до якої відноситься даний винахід, повинно бути зрозуміло після ознайомлення з даною заявкою, що ці терміни використовуються для опису певних розкритих і заявлених ознак, не обмежуючи їх

обсяг наведеними числовими діапазонами. Відповідно, ці терміни слід розглядати як такі, що вказують на те, що несуттєві або незначні модифікації або зміни об'єкта, що розкритий і заявлений в даному винаході, також підпадають під його обсяг, що визначений формулою винаходу, яка додається.

5 Слід відзначити, що термін «наведений як приклад», який використовується в даному документі для опису різних варіантів здійснення, лише вказує на те, що такі варіанти здійснення являють собою можливі приклади, втілення й/або ілюстрації можливих варіантів здійснення (і такий термін не означає, що ці варіанти здійснення є обов'язково примітними або чудовими прикладами).

10 Терміни «поєднаний», «з'єднаний» і т. п., що використовуються в даному документі, описують безпосереднє або опосередковане зрощення двох елементів один з одним. Таке зрощення може бути стаціонарним (наприклад, постійним) або динамічним (наприклад, знімним або роз'ємним). Таке зрощення може бути одержано двома елементами або двома елементами з будь-якими додатковими проміжними елементами, виконаними заодно у вигляді єдиного, 15 цілісного об'єкта один з одним або з двома елементами або двома елементами і будь-якими додатковими проміжними елементами, що прикріплені один до одного.

Вказівки, що використовуються в даному документі, на положення елементів (наприклад, «верхній», «нижній», «над», «під» і т. д.) використовуються виключно для опису просторового положення різних елементів на ФІГУРАХ. Слід відзначити, що просторове положення різних 20 елементів може відрізнитися в інших наведених як приклад варіантах здійснення, і такі відмінності входять в обсяг даного винаходу.

Важливо відзначити, що конструкція і розташування системи для активного сканування паливних стрижнів ядерного реактора, показаної й/або описаної з використанням різних наведених як приклад варіантів здійснення, є виключно ілюстративною. Незважаючи на те, що в 25 даному документі детально були описані лише декілька варіантів здійснення, фахівцям у галузі техніки після прочитання цього розкриття будуть зрозумілі різні можливі модифікації (наприклад, варіанти розмірів, габаритів, структур, форм і пропорцій різних елементів, величин параметрів, встановлюваних компонувань, застосування матеріалів, кольорів, просторових положень і т. д.), які не виходять за межі нових ознак і переваг об'єкта даного винаходу. 30 Наприклад, елементи, що зображені виконаними як єдине ціле, можуть бути виконані з декількох деталей або елементів, елементи можуть бути змінені місцями або їх положення можуть бути змінені іншим чином, а властивості та кількість окремих елементів або положень може бути змінено. Порядок або послідовність стадій будь-якого процесу або способу може бути змінена відповідно до альтернативних варіантів здійснення. Також у конструкції, умовах 35 функціонування і розташуванні згідно з різними наведеними як приклад варіантами здійснення можуть бути виконані інші заміни, модифікації, зміни й опущення, що не виходять за межі обсягу даного винаходу.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

40 1. Система активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, причому система містить:

а) підсистему генератора нейтронів, що включає:

45 i) генератор нейтронів з електричним приводом, що містить іонне джерело, прискорювач, камеру та мішень у зазначеній камері, при цьому зазначене іонне джерело та прискорювач виконані з можливістю генерування іонного пучка, який влучає у зазначену мішень, тим самим генеруючи нейтрони у зазначеній камері безперервним чином, коли генератор нейтронів увімкнений;

50 ii) сповільнювач, розташований навколо зазначеної камери і виконаний з можливістю сповільнення зазначених нейтронів, згенерованих генератором нейтронів, тим самим генеруючи заданий потік нейтронів; і

55 iii) канал для першого паливного стрижня, розташований всередині сповільнювача, причому канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому першого паливного стрижня ядерного реактора і впливу на перший паливний стрижень потоком нейтронів із заданими параметрами безперервним чином; в якій канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, що має внутрішній і зовнішній шари, причому зазначений внутрішній шар розташований ближче до першого паливного стрижня, ніж зазначений зовнішній шар, коли перший паливний стрижень знаходиться у зазначеному каналі, в якій внутрішній шар виконаний з можливістю розсіювання швидких нейтронів у надтепловій

області і зовнішній шар виконаний з матеріалу, що вигорає, і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів; і

b) підсистему сканування, розташовану поза підсистемою генератора нейтронів, причому підсистема сканування включає:

5 i) множину детекторів випромінювання, і

ii) комп'ютер, електроніку та програмне забезпечення для керування підсистемою сканування, в якій зазначений потік нейтронів із заданими параметрами індукує допоміжне випромінювання миттєвих та запізнілих гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію з першого паливного стрижня, що виявляється множиною детекторів випромінювання, щоб дозволити зазначеній підсистемі сканування визначити кількість речовини, що поділяється, в першому паливному стрижні і просторовий розподіл речовини, що поділяється, за довжиною першого паливного стрижня.

2. Система за п. 1, що додатково включає перший паливний стрижень, причому перший паливний стрижень містить речовину, що поділяється, та матеріал, що вигорає.

15 3. Система за п. 1, в якій внутрішній шар є концентричним до зовнішнього шару.

4. Система за п. 3, в якій внутрішній шар виконаний з берилію.

5. Система за п. 1, в якій матеріал, що вигорає, містить гадоліній або бор.

6. Система за будь-яким з попередніх пунктів, в якій потік нейтронів із заданими параметрами являє собою потік надтеплових нейтронів, і зазначені надтеплові нейтрони індукують допоміжне випромінювання, яке виявляється множиною детекторів випромінювання.

7. Система за будь-яким з попередніх пунктів, в якій іонне джерело являє собою мікрохвильове іонне джерело або іонне джерело на основі електронного циклотронного резонансу (ЕЦР).

8. Система за будь-яким з попередніх пунктів, в якій мішень являє собою тверду мішень, що складається щонайменше з одного з титану, міді, цирконію, урану, паладію або алюмінію.

25 9. Система за будь-яким з попередніх пунктів, в якій сповільнювач, що оточує камеру, містить графіт або D₂O; і

підсистема генератора нейтронів додатково включає додатковий сповільнювач, розташований навколо сповільнювача, причому додатковий сповільнювач містить поліетилен.

10. Система за п. 9, в якій камера містить діелектрик у твердому, рідкому або газоподібному станах.

11. Система за будь-яким з пп. 9-10, в якій додатковий сповільнювач виконаний з борованого поліетилену з вмістом 5 % бору.

12. Система за будь-яким з попередніх пунктів, в якій канал для першого паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, зовнішній шар якої виконаний з матеріалу, що вигорає, і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів.

13. Система за п. 9, що додатково включає канал для другого паливного стрижня, виконаний з можливістю розміщення в ньому другого паливного стрижня ядерного реактора і впливу на другий паливний стрижень потоком нейтронів із заданими параметрами безперервним чином, причому зазначений потік нейтронів є потоком теплових нейтронів із заданими параметрами; в якій:

канал для другого паливного стрижня розташований всередині сповільнювача; і

зазначений потік теплових нейтронів із заданими параметрами індукує допоміжне випромінювання гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію в другому паливному стрижні, що виявляється щонайменше одним з множини детекторів випромінювання, щоб підсистема сканування могла визначити кількість речовини, що поділяється, і просторовий розподіл речовини, що поділяється, за довжиною другого паливного стрижня.

14. Система за п. 13, в якій канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої виконаний з алюмінію, а внутрішній шар виконаний з поліетилену.

15. Система за будь-яким з попередніх пунктів, що додатково включає щонайменше один додатковий канал для паливного стрижня, виконаний з можливістю розміщення в ньому додаткового паливного стрижня ядерного реактора і впливу на додатковий паливний стрижень потоком нейтронів із заданими параметрами безперервним чином, причому зазначений потік нейтронів є потоком надтеплових або теплових нейтронів; в якій зазначений потік нейтронів із заданими параметрами індукує допоміжне випромінювання гамма-променів, нейтронне випромінювання або їх комбінацію в додатковому паливному стрижні, що виявляється щонайменше одним з множини детекторів випромінювання, щоб підсистема сканування могла визначити кількість речовини, що поділяється, і просторовий розподіл речовини, що поділяється, за довжиною додаткового паливного стрижня.

16. Система за п. 13, в якій:

мішень є твердою мішенню, що складається з титану;

- сповільнювач виконаний з графіту;
 додатковий сповільнювач виконаний з борованого поліетилену;
 зовнішній шар виконаний з гадолінію, а внутрішній шар виконаний з берилію;
 канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного
- 5 стрижня, що містить гадоліній;
 канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої виконаний з алюмінію, а внутрішній шар виконаний з поліетилену; і
 канал для другого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня, що не містить матеріалу, що вигорає.
- 10 17. Система за п. 13, в якій:
 мішень є твердою мішенню, що складається з титану;
 сповільнювач виконаний з графіту;
 додатковий сповільнювач виконаний з борованого поліетилену;
 зовнішній шар виконаний з бору, а внутрішній шар виконаний з берилію;
- 15 канал для першого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного стрижня, що містить бор;
 канал для другого паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої виконаний з алюмінію, а внутрішній шар виконаний з поліетилену; і
 канал для другого паливного стрижня виконаний з можливістю розміщення в ньому паливного
- 20 стрижня, що не містить матеріалу, що вигорає.
18. Спосіб активного сканування паливного стрижня ядерного реактора, причому спосіб включає:
 генерування нейтронів за допомогою генератора нейтронів з електричним приводом, що містить іонне джерело, прискорювач і мішень;
- 25 сповільнення нейтронів за допомогою сповільнювача, розташованого навколо генератора нейтронів;
 розміщення паливного стрижня в каналі для паливного стрижня, розташованого всередині сповільнювача;
 за яким канал для паливного стрижня містить внутрішню надтеплову оболонку, що має
- 30 внутрішній і зовнішній шари, причому внутрішній шар розташований ближче до паливного стрижня, ніж зовнішній шар, коли паливний стрижень знаходиться у зазначеному каналі, в якому внутрішній шар виконаний з можливістю розсіювання швидких нейтронів у надтепловій області, а зовнішній шар виконаний з матеріалу, що вигорає, і виконаний з можливістю поглинання теплових нейтронів;
- 35 вплив на паливний стрижень потоком нейтронів із заданими параметрами для індукування допоміжного випромінювання миттєвих і запізнілих гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх комбінації; і виявлення допоміжного випромінювання за допомогою множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня.
- 40 19. Спосіб за п. 18, за яким паливний стрижень містить матеріал, що вигорає.
 20. Спосіб за п. 18 або 19, за яким паливний стрижень містить гадоліній або бор.
 21. Спосіб за будь-яким з пп. 18-20, за яким потік нейтронів із заданими параметрами є потоком надтеплових нейтронів, і надтеплові нейтрони індукують допоміжне випромінювання, яке виявляється множиною детекторів випромінювання.
- 45 22. Спосіб за будь-яким з пп. 18-21, що додатково передбачає:
 розміщення другого паливного стрижня, що не містить матеріалу, що вигорає, у другому каналі для паливного стрижня;
 вплив на другий паливний стрижень потоком нейтронів із заданими параметрами для індукування допоміжного випромінювання гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх
- 50 комбінації; і
 виявлення допоміжного випромінювання другого паливного стрижня за допомогою щонайменше одного з множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною другого паливного стрижня.
- 55 23. Спосіб за п. 22, за яким другий канал для паливного стрижня містить внутрішню теплову оболонку, зовнішній шар якої виконаний з алюмінію, а внутрішній шар - з поліетилену, і спосіб додатково передбачає зменшення щільності надтеплових нейтронів за допомогою внутрішнього шару і зовнішнього шару внутрішньої теплової оболонки.
 24. Спосіб за будь-яким з пп. 18-23, що додатково передбачає:

- розміщення паливного стрижня, що не містить матеріалу, що вигорає, в щонайменше одному додатковому каналі для паливного стрижня;
вплив на паливний стрижень потоком надтеплових нейтронів або потоком теплових нейтронів із заданими параметрами для індукування допоміжного випромінювання гамма-променів, нейтронного випромінювання або їх комбінації; і
- 5 виявлення допоміжного випромінювання з паливного стрижня за допомогою щонайменше одного з множини детекторів випромінювання для визначення кількості речовини, що поділяється, і просторового розподілу речовини, що поділяється, за довжиною паливного стрижня.
- 10 25. Спосіб за будь-яким з пп. 18-24, за яким мішень є твердою мішенню, що містить атоми дейтерію, і за яким генерування нейтронів за допомогою генератора нейтронів з електричним приводом передбачає обстріл твердої мішені пучком прискорених іонів дейтерію для генерування нейтронів внаслідок термоядерної реакції дейтерій-дейтерій.
- 15 26. Спосіб за п. 25, що додатково передбачає поповнення атомів дейтерію, що містяться в твердій мішені, за рахунок опромінення твердої мішені пучком прискорених іонів дейтерію.
27. Спосіб за п. 26, за яким тверда мішень складається щонайменше з одного з наступних елементів: титан, мідь, цирконій, уран, паладій або алюміній.
28. Спосіб за будь-яким з пп. 18-27, за яким сповільнювач, що оточує зазначену камеру, містить графіт або D₂O, і за яким додатково включено додатковий сповільнювач, розташований
- 20 навколо сповільнювача, що оточує зазначену камеру, і за яким сповільнення нейтронів за допомогою сповільнювача передбачає використання сповільнювача для тепловізації нейтронів, згенерованих генератором нейтронів з електричним приводом, і поглинання тепловізованих нейтронів за допомогою додаткового сповільнювача.
29. Спосіб за п. 28, за яким додатковий сповільнювач виконаний з поліетилену.
- 25 30. Спосіб за п. 28 або 29, за яким камера містить твердий, рідкий або газоподібний діелектрик.

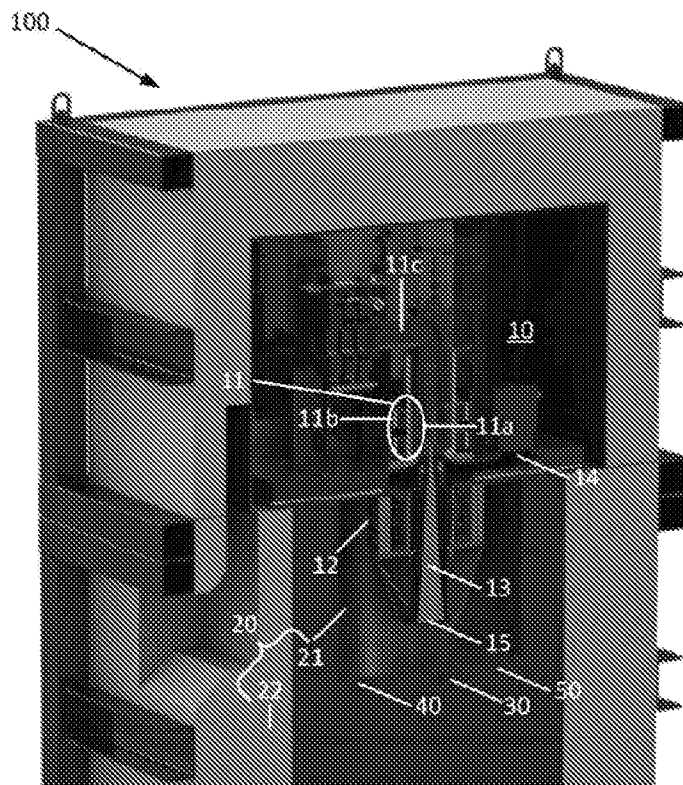
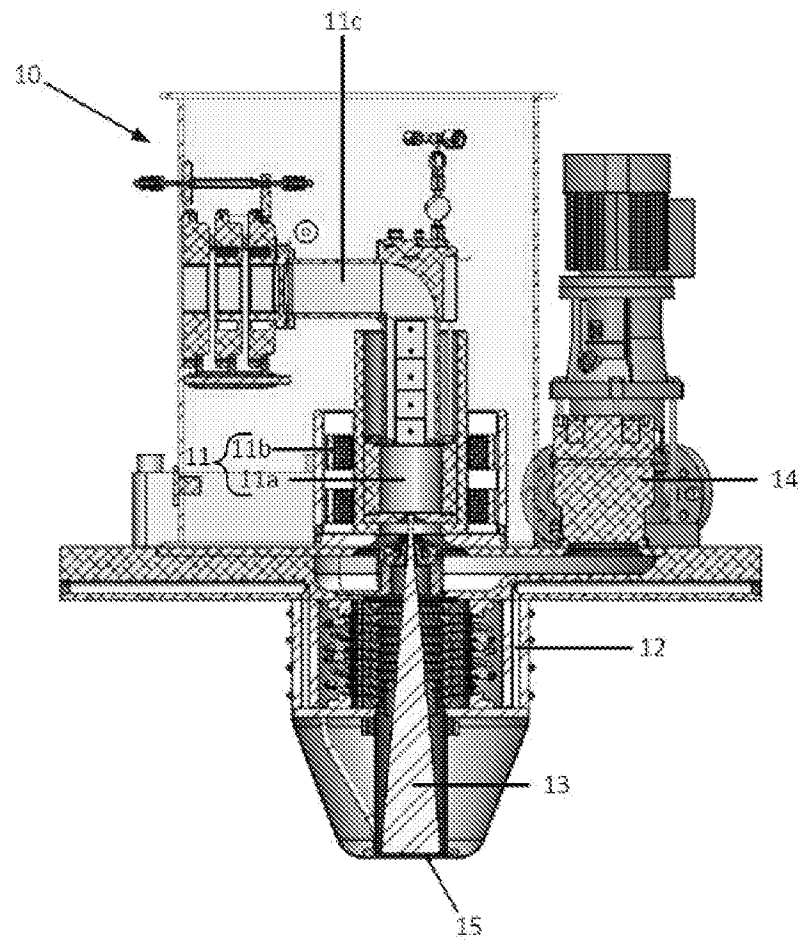


Fig. 1



Фиг. 2

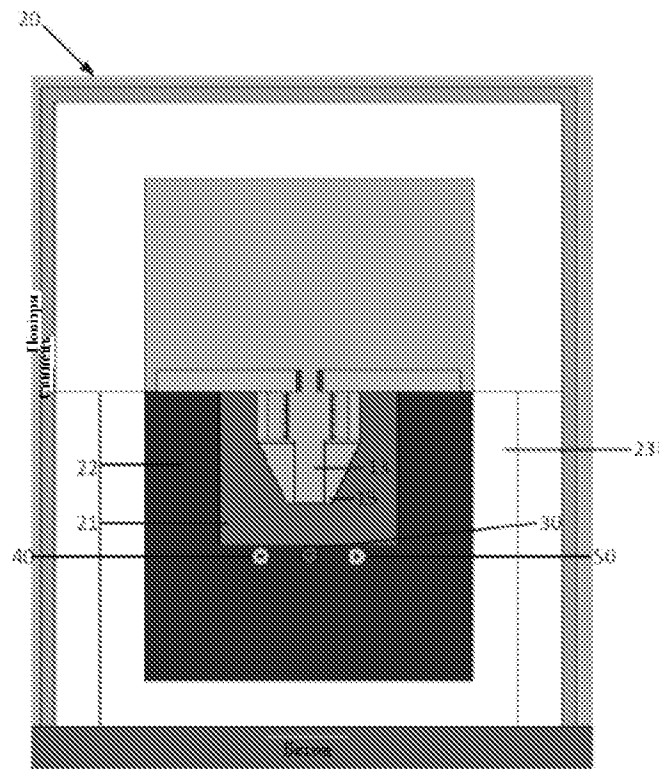


Fig. 3

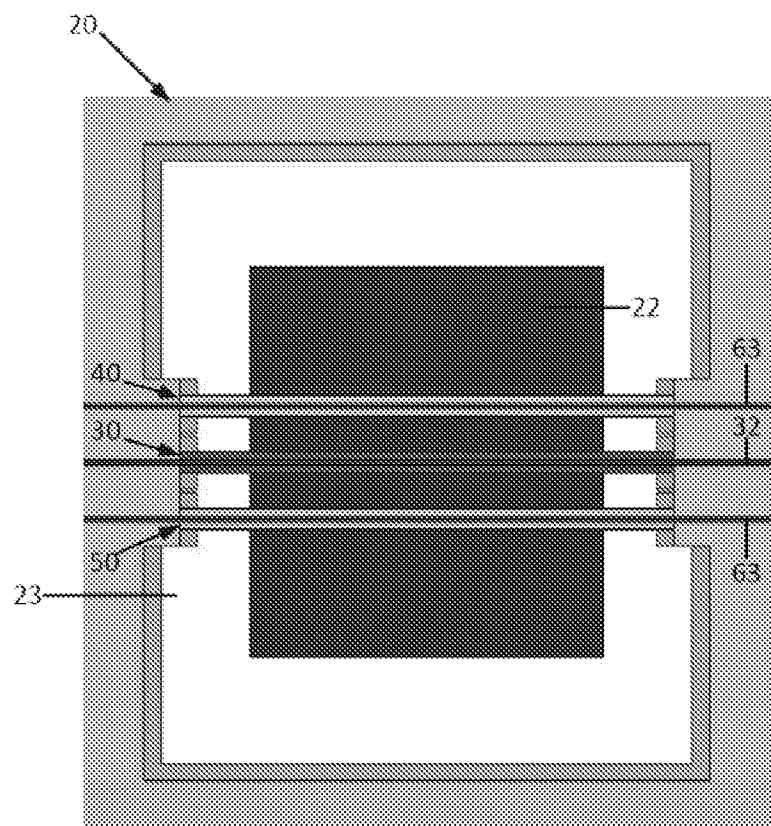


Fig. 4

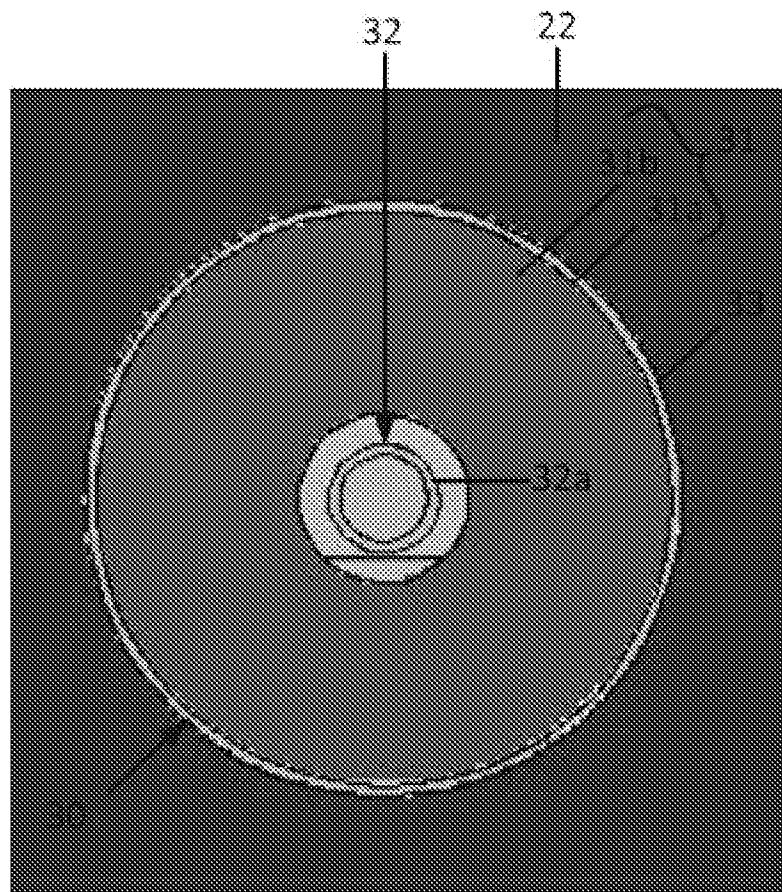


Fig. 5

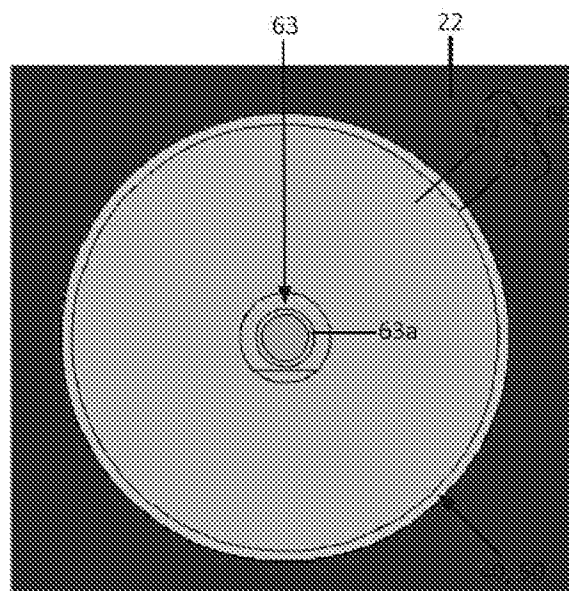
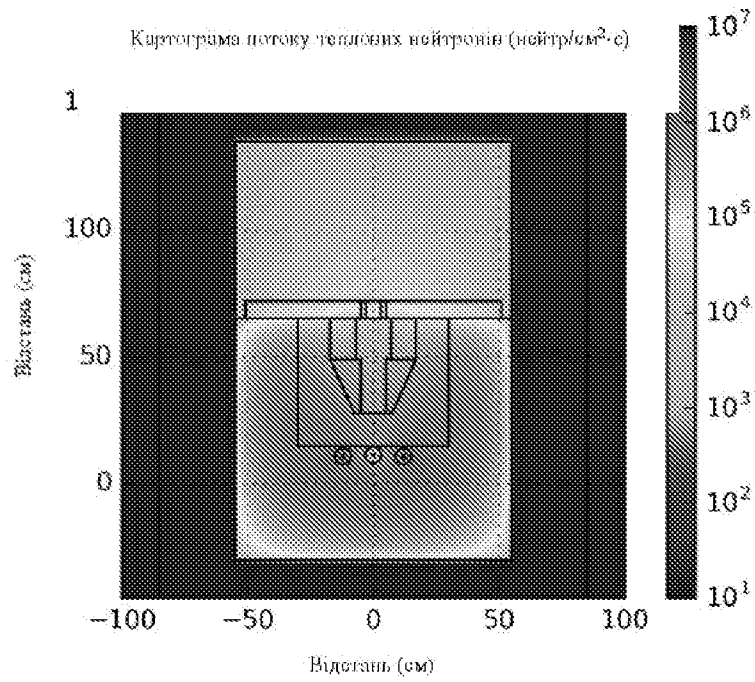
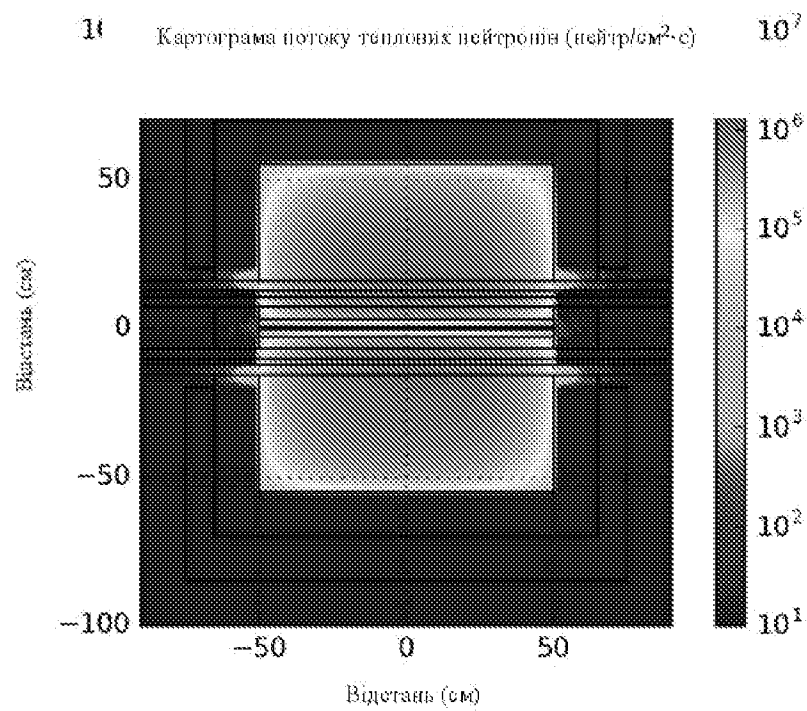


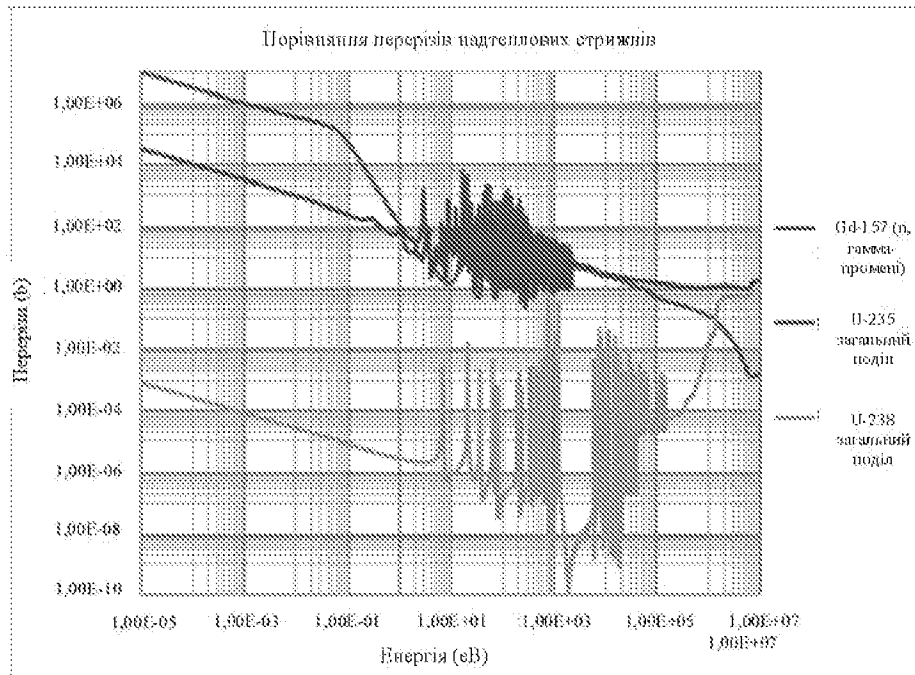
Fig. 6



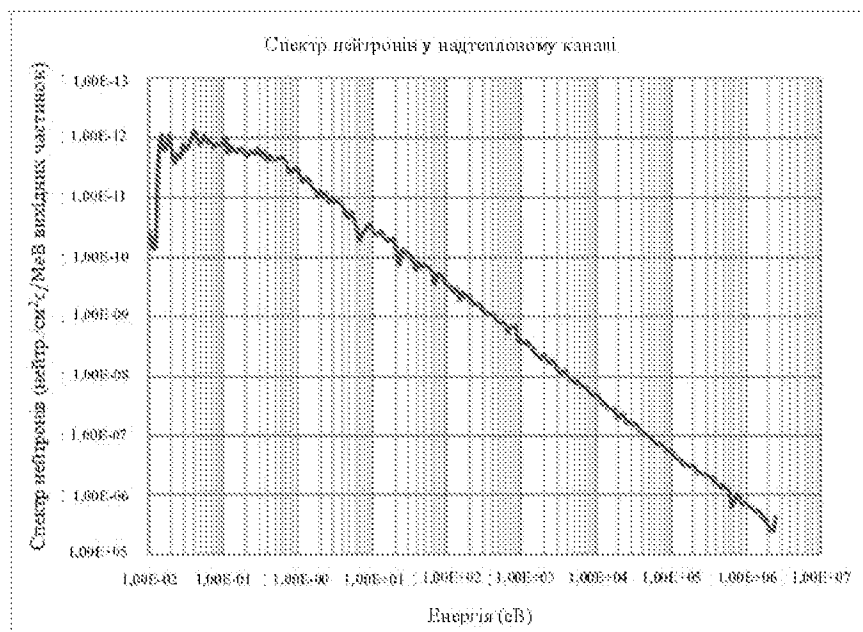
Фіг. 7



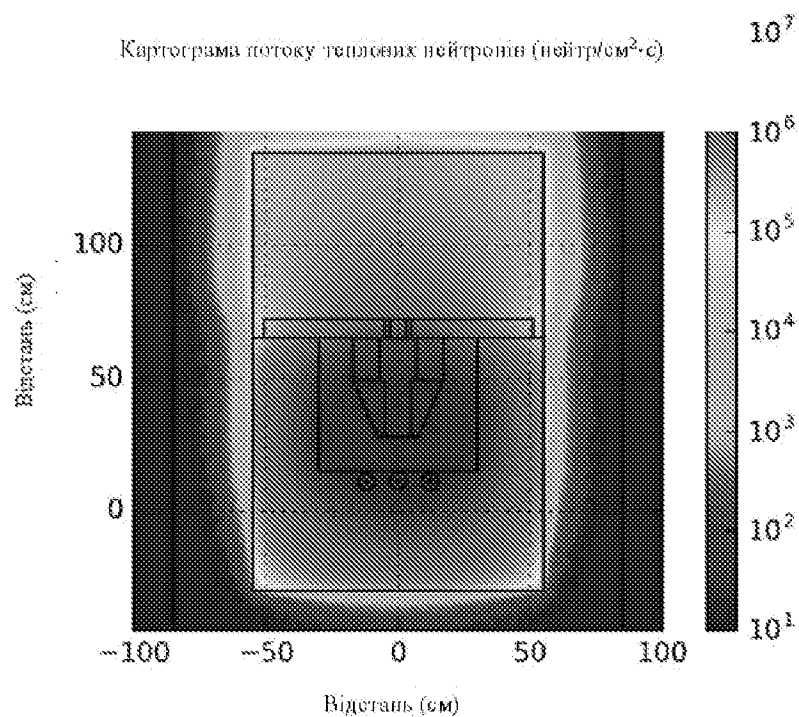
Фіг. 8



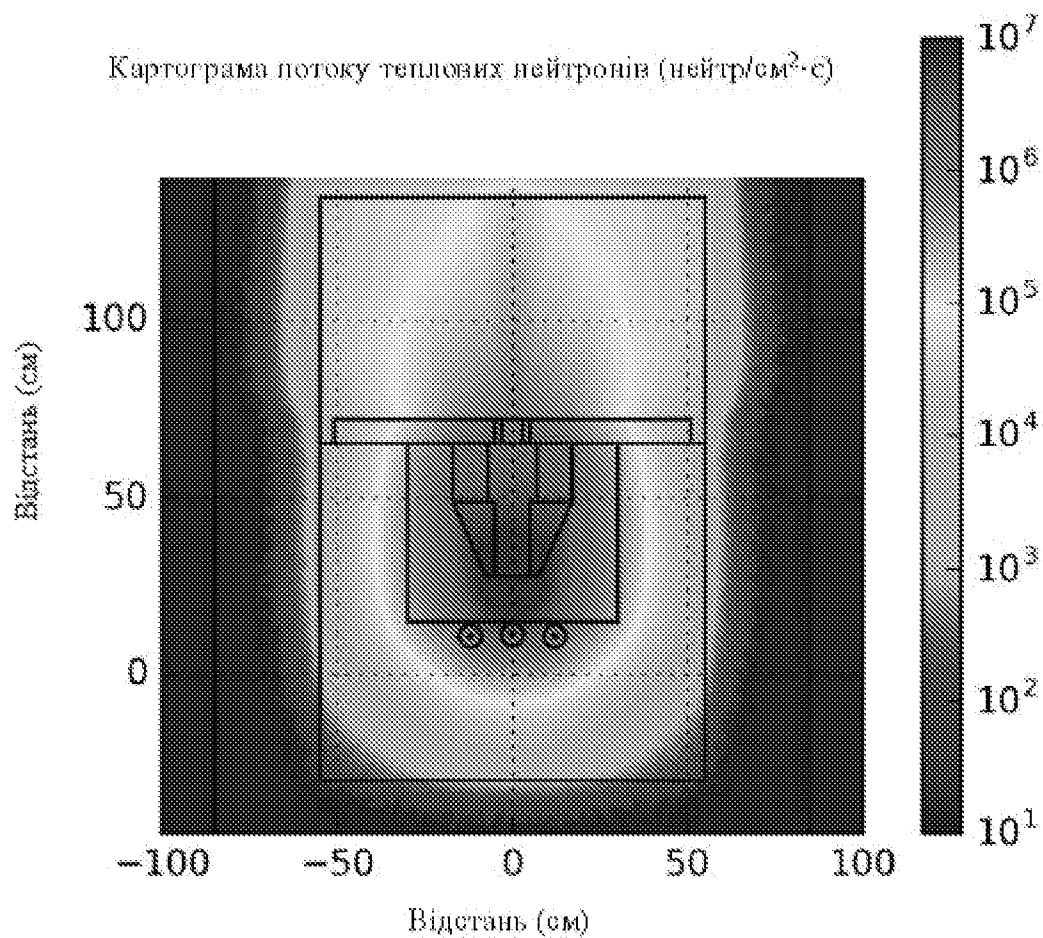
Фіг. 9



Фіг. 10



Фіг. 11



Фіг. 12

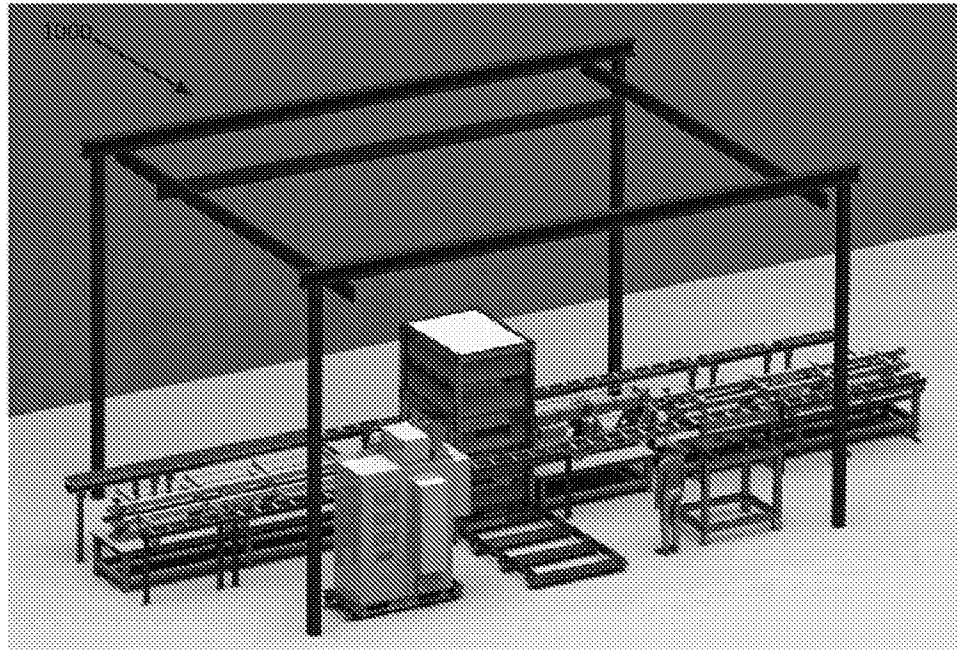


Fig. 13

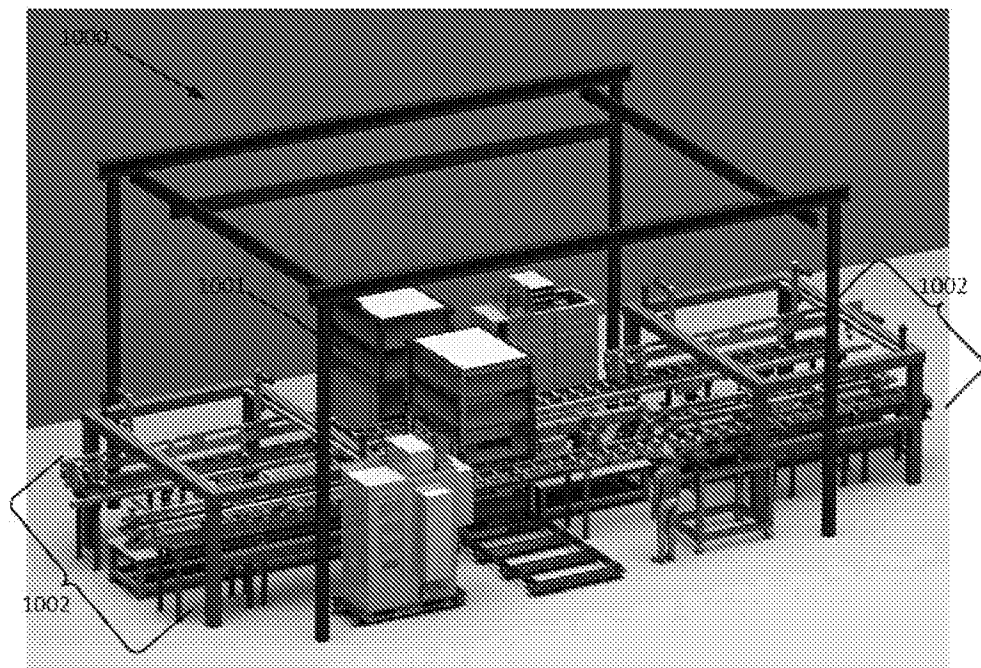


Fig. 14

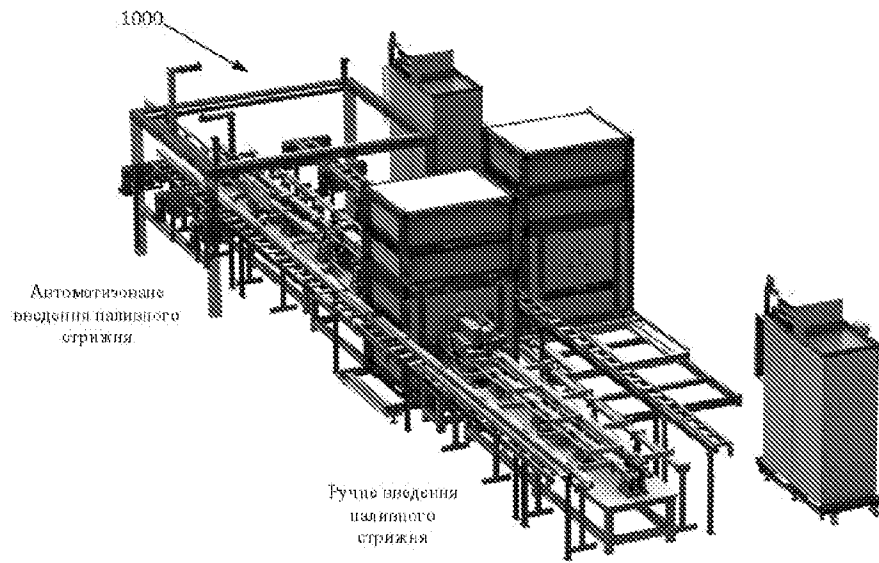


Fig. 15

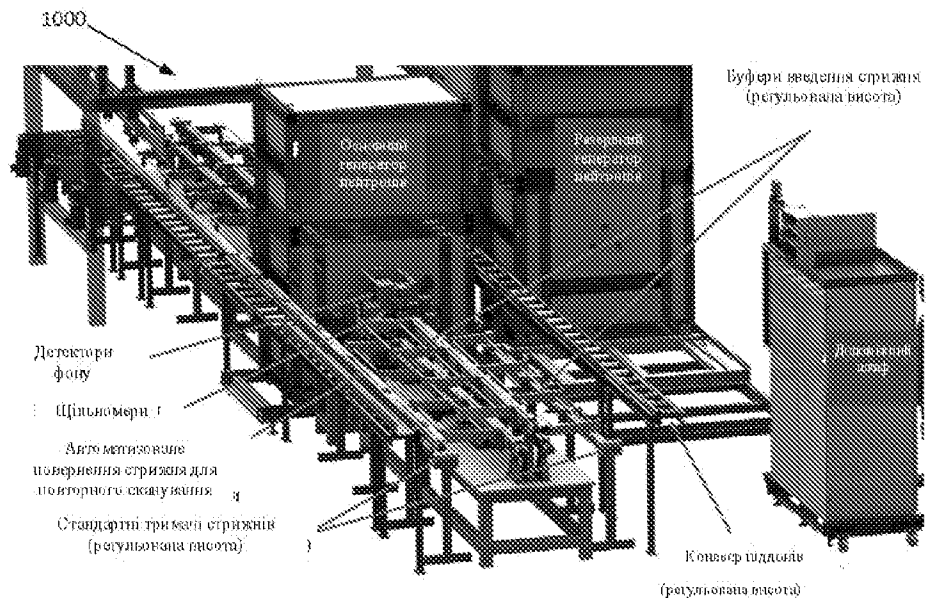
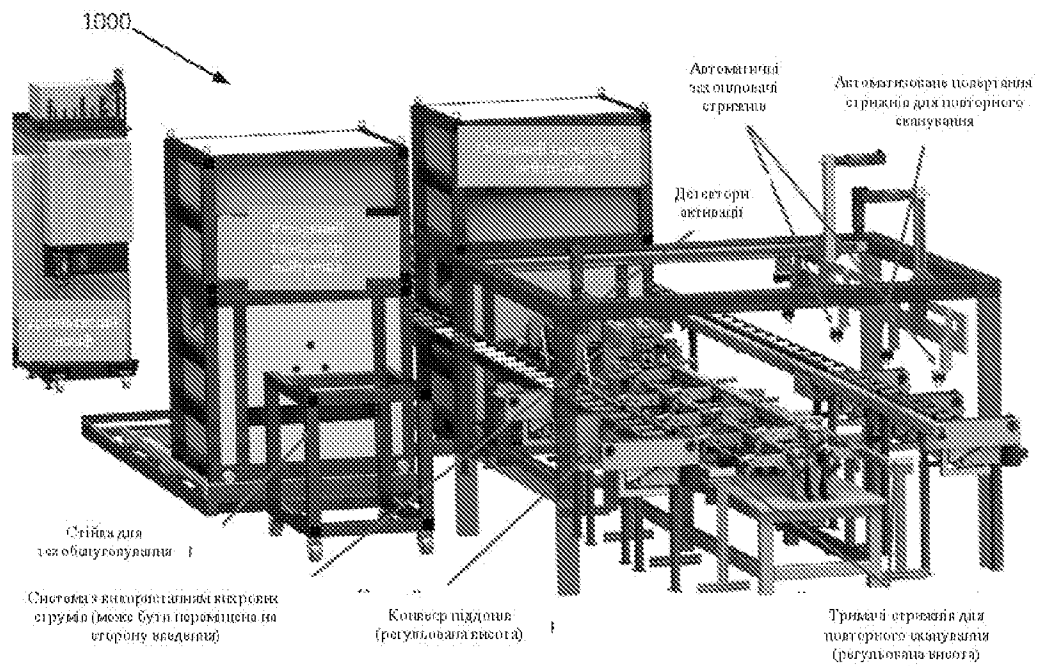


Fig. 16



Фіг. 17