

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202191553** (13) **A1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2022.08.11

(51) Int. Cl. *G21C 11/00* (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2019.12.13

(54) ЭКРАНИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА И СПОСОБ ЕЕ СОЗДАНИЯ

(31) 62/779,822

(32) 2018.12.14

(33) US

(86) PCT/US2019/066294

(87) WO 2020/123983 2020.06.18

(71) Заявитель:
**РЭД ТЕКНОЛОДЖИ МЕДИКАЛ
СИСТЕМЗ, ЛЛК (US)**

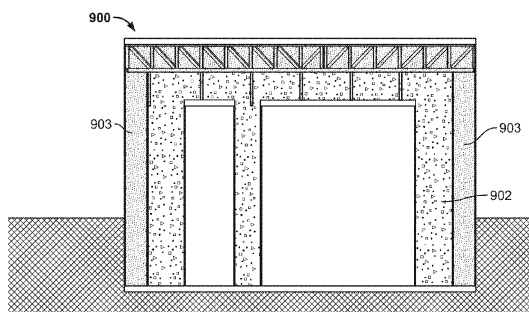
(72) Изобретатель:

**Форд Джон, Джонстон Рон, Кеппель
Синтия, Амбросевич Павел, Ландау
Эрик, Оквист Чери, Лефкус Джон
(US)**

(74) Представитель:

**Хмара М.В., Рыбаков В.М., Липатова
И.И., Новоселова С.В., Дощечкина
В.В., Пантелеев А.С., Ильмер Е.Г.,
Осипов К.В. (RU)**

(57) В одном из вариантов осуществления согласно настоящему изобретению предложена установка, включающая в себя устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 5 до 500 МэВ, первую экранирующую излучение стену, окружающую устройство, вторую экранирующую излучение стену, окружающую первую экранирующую излучение стену, экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной и второй экранирующей излучение стеной с образованием первого барьера. В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 12 до 83 в количестве по меньшей мере 50 мас.%, при этом толщина первого барьера составляет от 0,5 до 6 м.



A1

202191553

202191553

A1

ЭКРАНИРУЮЩАЯ УСТАНОВКА И СПОСОБ ЕЕ СОЗДАНИЯ

Перекрестная ссылка на родственные заявки

5 [0001] В настоящей заявке испрашивается приоритет по предварительной заявке на патент США с порядковым № 62/779,822, поданной 14 декабря 2018 г., во всей полноте и во всех смыслах включенной в настоящую заявку посредством отсылки.

Финансируемые из федерального бюджета исследования или разработки

10 [0002] Нет

Область техники, к которой относится изобретение

15 [0003] В вариантах осуществления настоящее раскрытие в целом относится к области экранирования радиоактивных излучений и экранирования адронов, например, протонов, нейтронов, пионов и тяжелых ионов, в адронной терапии и в случаях применения для экранирования фотонов в радиотерапии. В вариантах осуществления настоящее раскрытие относится в целом к области экранирования радиоактивных излучений в случаях, когда оптимизация экранирующего материала независимо от конструкции может обеспечивать преимущества, в том числе, без
20 каких-либо ограничений, в радиотерапии, атомной энергетике, научных исследованиях и промышленных ускорителях.

Предшествующий уровень техники

25 [0004] Установки генерирования и ускорения частиц используют во многих сферах, например, для научных исследований, генерации энергии и промышленного неразрушающего контроля, а также в медицине. Излучение в виде фотонных (рентгеновских и гамма-лучевых) и электронных пучков уже много лет используют в целях диагностики, лечения, направленного воздействия, в промышленности, аэрокосмической отрасли и в исследовательских целях. Для этих
30 целей используют уровни энергии в диапазоне от низких уровней в кэВ (от 5кэВ до 250кэВ) до 25 МэВ, при этом фотонные и электронные пучки от 10МэВ до 25МэВ представляют самые высокие уровни энергии, обычно используемые в радиотерапии на сегодняшний день. Так как эти типы излучения и уровни энергии традиционно использовались в подавляющем большинстве указанных случаев при
35 создании корпусов, сдерживающих распространение излучения, традиционно использовали материалы, средства и способы, наиболее подходящие для

комбинации физических угроз, присущих исключительно указанным типам излучения и используемым уровням энергии и интенсивности. С учетом этого набора физических угроз, цели были относительно просты: остановить или сдержать распространение электронов и фотонов и/или иных форм вторичного ионизирующего излучения, возникающих в результате взаимодействий источников первичного излучения. Распространение высокоэнергетических электронных пучков, а также любого создаваемого ими вторичного (рассеянного) излучения, относительно легко остановить. Высокоэнергетические фотоны обладают гораздо больше проникающей способностью и создают гораздо большее рассеянное излучение, в связи с чем требуют наличия гораздо более существенных экранирующих конструкций (корпусов). Поэтому физические свойства фотонного излучения, проникновение и ослабление являются основными факторами при разработке известных решений для экранирования при радиотерапии, т.е. при выборе используемых материалов, проектировании и строительстве герметичного корпуса. Для удовлетворения указанных физических потребностей и соблюдения ограничений, традиционно наиболее часто использовали решение в виде бетонного корпуса и/или бетонного блока со стенами и потолком толщиной от двух (2) до восьми (8) футов (от 0,61 до 2,44 м), в которых бетон служил для удовлетворения потребностей в экранировании, одновременно образуя несущую конструкцию как таковую или будучи конструктивно автономным. За несколько последних лет было внедрено другое решение, состоящее в обособлении экранирующих и несущих элементов и удовлетворяющее указанные две потребности за счет разных материалов. Например, и в корпусе Системы PRO, и во Временном радиотерапевтическом корпусе (БРК, англ. Temporary Radiotherapy Vault (TRV)) компании «РАД Текнолоджи Медикал Системс» (RAD Technology Medical Systems) использована сборная конструкция из стальных модулей для выполнения несущих функций в корпусе, при этом данные модули также выполняют функцию камер для размещения «любого достаточно плотного зернистого материала, легкодоступного из местных источников» для удовлетворения потребностей в экранировании. Указанные известные решения компании «РАД Текнолоджи» позволяют создавать радиоонкологические или промышленные корпуса, которые являются модульными и несложными в транспортировке, однако зачастую физически больше по размерам, чем корпуса из наливного бетона или бетонных блоков, из-за использования в них экранирующих материалов с плотностью, меньшей, чем у бетона. Разница в габаритных размерах (занимаемой площади) обычно не настолько велика, чтобы придавать ей значение из-за относительно низких энергий. Однако разница в части

транспортабельности, возможности восстановления и адаптивности коренным образом меняет представление об экранировании в данной отрасли. При этом известные корпуса компании «РАД Текнолоджи» имеют одну общую характеристику с традиционными бетонными корпусами: их проектируют и строят для экранирования фотонов с энергией среднего диапазона и даже от возникающих из них вторичных нейтронов с более низкой энергией. При этом вторичное нейтронное излучение относительно невелико и является, в связи с этим, менее влиятельным фактором. За счет пары дополнительных дюймов борированного полиэтилена и, возможно, некоторого дополнительного количества многослойной фанеры или гипса можно справиться с небольшим вторичным нейтронным излучением: базовая конструкция корпуса остается без изменений.

[0005] В последние годы выросло использование ускорителей протонов и, как следствие, использование нового и альтернативного способа лечения – протонной терапии. Данные ускорители протонов работают с энергиями более чем на целый порядок выше, чем в способах с использованием фотонных и электронных пучков, в связи с чем им присущ совершенно новый набор физических угроз, требующих новых решений по экранированию. Радиоактивное излучение, возникающее при создании и/или использовании протонов, нейтронов или иных тяжелых частиц, например, адронов, будь то первичный пучок или вторичное излучение, образующееся как побочный продукт первичного пучка, необходимо экранировать для защиты находящегося поблизости персонала, населения и оборудования. Поэтому при проектировании и строительстве установок, содержащих указанное оборудование, необходимо обеспечить достаточное ослабление излучений различных типов, уровней энергии и интенсивности во избежание облучения людей и, в некоторых случаях, оборудования как внутри установки, так и за ее пределами. Уровни излучения внутри таких установок и за их пределами также должны соответствовать применимым нормативным требованиям федеральных властей и властей штата.

[0006] Ускорительные установки для протонов и иных тяжелых ионов обычно состоят из бетонных стен, потолков и полов, толщина которых может составлять от 8 до 20 футов (от 2,44 до 6,10 м) и более. Бетон выполняет и экранирующую, и несущую функцию в установке. Однако, как показала практика, его использование является затратным в части времени, финансов и недвижимого имущества (размер/занимаемая площадь). Учитывая энергии, в некоторых случаях превосходящие 250МэВ/нуклон (протон или нейтрон), для ускорения более массивных протонов и тяжелых ионных частиц (например, ионов углерода),

физические угрозы не только более существенны, но и в корне отличны от тех, что связаны с традиционной радиотерапией.

[0007] Основным вопросом, вызывающим беспокойство в связи с указанной новой угрозой, является проникновение нейтронов. Протоны и нейтроны более чем в 1800 раз массивнее электронов, при этом энергии ускорения в ускорителях пучков этих новых частиц могут более чем в 10 раз превышать энергии, традиционно используемые в ускорителях пучков фотонов и электронов. Как и гамма-излучение, нейтроны вступают с веществом во взаимодействия с рассеянием и поглощением. Эти взаимодействия лежат в основе способов экранирования нейтронного излучения. Однако, в отличие от гамма-излучения, взаимодействующего, в основном, с электронами атомов в веществе, нейтроны взаимодействуют, в основном, с атомными ядрами. Поэтому предпочтительные для экранирования нейтронов типы материалов существенно отличаются от плотных поглотителей с высоким атомным числом, весьма эффективных для ослабления гамма-излучения. Обычно, в случае быстрых нейтронов, взаимодействия с рассеянием более вероятны, чем взаимодействия с захватом. Более того, по мере ослабления энергии нейтронов в результате взаимодействий с рассеянием, растет вероятность и число дополнительных взаимодействий нейтронов, например, с захватом. Взаимодействия высокоэнергетических протонов (или тяжелых ионов) с объектами или компонентами в пределах ускорительного устройства, в воздухе, внутри пациента, с другими объектами в помещении и даже с самими экранирующими стенами приводят к возникновению вторичного или рассеянного излучения. Это также происходит при использовании традиционных способов с использованием фотонных и электронных пучков. Однако, в отличие от способов с использованием фотонов и электронов, более массивные адронные частицы при более высоких энергиях вступают в другие взаимодействия и создают существенные уровни нейтронного излучения с широким спектром энергий от близкой к нулю до энергии пучка. Каждая из частиц с разными энергиями вступает в разные первичные реакции с разными вероятностями реакции. Пациент по существу полностью поглощает протоны, тогда как образующиеся вторичные частицы – фотоны и, что наиболее важно, нейтроны—проникают в экранирующие барьеры и становятся основной угрозой. Угроза высокоэнергетического нейтронного излучения с широким спектром и высоким флюенсом требует кардинально иного решения для экранирования.

[0008] Кроме того, существенной угрозой в указанных новых условиях излучения является «активация», при которой традиционный экранирующий

материал—бетон становится радиоактивным из-за длительного воздействия очень высокоэнергетического излучения. В случае некоторых из этих «активированных» бетонных компонентов, распад до безопасных уровней длится годы и даже десятки лет, в связи с чем они могут представлять как непосредственную, так и
5 долговременную угрозу для безопасности.

[0009] Традиционные адронные и радиационные (излучательные) установки имеют множество недостатков с точки зрения экранирования. Традиционные экранирующие стены обычно состоят из бетонной смеси, которую формуют на месте способом непрерывного бетонирования, в связи с чем возникают трудности с
10 планированием и существенная потеря времени, следствием чего является потеря рыночных возможностей (получения дохода). Обязательное использование очень толстых бетонных стен еще больше увеличивает и так высокую стоимость и большую занимаемую площадь установки с адронным излучением и уменьшает полезную площадь как в пределах установки, так и на самом земельном участке.
15 Более того, указанный способ не обеспечивает возможность беспрепятственного ремонта и модификации созданной в результате конструкции. Вывод из эксплуатации и удаление конструкции по окончании ее срока службы усложняется необходимостью удаления и надлежащей утилизации радиоактивного материала в экранирующем барьере. В традиционных бетонных экранирующих корпусах
20 некоторое количество материала бетонного барьера становится радиоактивным в результате долговременной бомбардировки крупными высокоэнергетическими частицами. Учитывая значительный период его радиоактивного полураспада, этот материал необходимо либо оставить на месте, надежно защитить и изолировать от взаимодействия с человеком, либо разрушить и утилизировать в соответствии с
25 применимыми законодательными и нормативными требованиями со значительными трудозатратами, затратами времени и средств. Кроме того, бетон не является однородным, следствием чего является изменчивость плотности экранирования и иных характеристик экранирующих стен, а также их ухудшение со временем, что приводит к неполному захвату и/или замедлению излучающих частиц.

[0010] Использование бетона также может влечь за собой необходимость заделки в наливной конструкции множества каналов и проходов, число которых может быть большим, а маршрут – сложным, чтобы обеспечить отсутствие полостей в экране. Так как в известном здании из наливного бетона экранирующие стены являются несущими, в бетонные стены также заделывают арматурный прокат
30 для увеличения прочности конструкции на растяжение. Каналы должны не только иметь не прямые маршруты во избежание создания полостей в экране, но и быть
35

устроены в пределах арматурного поля, проектирование и укладка которого являются затратными по стоимости и времени.

[0011] Предложенное решение для экранирования не выполняет несущую функцию, в связи с чем не требует наличия арматурного поля. Более того, каналы могут быть помещены в модули до их доставки на площадку, что также сокращает общую продолжительность строительства на площадке для сложных конструкторских решений. В отличие от наливного бетона, если в будущем, в связи с изменениями или модернизацией системы, нужно будет модифицировать каналы или проходы или увеличить их протяженность, либо в случае выявления недостатков существующей планировки, предложенное в настоящем документе конструкторское решение с легкоудаляемым заполнителем позволит модифицировать любые проходки через экран.

[0012] Варианты осуществления настоящего раскрытия позволяют преодолеть указанные проблемы, в том числе, помимо прочего, за счет: (a) устранения необходимости в том, чтобы экран выполнял несущую функцию; (b) облегчения транспортировки экранирующего материала, обеспечения возможности его повторного использования или эффективного вывода из эксплуатации; (c) обеспечения возможности простого монтажа и удаления экранирующих материалов; (d) оптимизации ослабления нейтронов в зависимости от разнообразных взаимодействий фундаментальных процессов; (e) уменьшения долговременной активации (частицами с длительным периодом полураспада) экранирующего материала, снижения расходов на вывод из эксплуатации и уменьшения связанных с ним сложностей.

Сущность изобретения

[0013] В вариантах осуществления раскрыта установка, содержащая:

a. устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка энергии излучения в энергетическом диапазоне от 5 МэВ до 500 МэВ,

b. первый экранирующий барьер, окружающий устройство, причем толщина первого экранирующего барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров, причем первый экранирующий барьер включает в себя:

i. первую экранирующую излучение стену, окружающую устройство,

ii. вторую экранирующую излучение стену, окружающую первую экранирующую излучение стену,

iii. экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной и второй экранирующей излучение стеной с образованием первого барьера, причем экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 12 до 83 в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов.

[0014] В вариантах осуществления элемент с атомным числом от 12 до 83 выбран из группы, состоящей из: железа, свинца, вольфрама и титана.

[0015] В другом варианте осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит магнетит и/или гематит в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов.

[0016] В другом варианте осуществления экранирующий излучение заполнитель является зернистым.

[0017] В другом варианте осуществления энергетический диапазон пучка выбран из группы, состоящей из диапазонов: от 5 МэВ до 70 МэВ, от 5 МэВ до 250 МэВ и от 5 МэВ до 300 МэВ.

[0018] В других вариантах осуществления первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

[0019] В другом варианте осуществления первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена является стальной.

[0020] В другом варианте осуществления установка дополнительно содержит второй экранирующий барьер, причем второй экранирующий барьер включает в себя: третью экранирующую излучение стену, окружающую вторую экранирующую излучение стену первого экранирующего барьера; при этом второй экранирующий излучение заполнитель расположен между второй экранирующей излучение стеной и третьей экранирующей излучение стеной второго экранирующего барьера, причем второй экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 1 до 8 в количестве по меньшей мере 25 массовых процентов, причем толщина второго экранирующего барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров.

[0021] В одном из вариантов осуществления третья экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

[0022] В другом варианте осуществления третья экранирующая излучение стена является стальной.

[0023] В другом варианте осуществления элемент с атомным числом от 1 до 8 выбран из группы, состоящей из: водорода, углерода, кислорода и бора.

[0024] В одном из вариантов осуществления второй экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего: буру, гипс, колеманит, пластмассовый композит или известь.

5 **[0025]** В одном из вариантов осуществления пучок энергии излучения содержит частицы и/или фотоны.

[0026] В одном из вариантов осуществления частицы представляют собой адроны.

10 **[0027]** В одном из вариантов осуществления адроны включают в себя по меньшей мере одно из следующего: протоны, нейтроны, пионы, дейтроны, более тяжелые ионы ($A > 2$) или какую-либо их комбинацию.

[0028] В другом варианте осуществления раскрыта установка, содержащая:

a. множество электронных устройств,
b. первый экранирующий барьер, окружающий множество электронных устройств, причем толщина первого экранирующего барьера составляет от 0,5
15 метра до 6 метров, причем первый экранирующий барьер включает в себя:

i. первую экранирующую излучение стену, окружающую множество электронных устройств,
ii. вторую экранирующую излучение стену, окружающую первую экранирующую излучение стену,
20 iii. экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной, причем экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 12 до 83 в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов.

25 **[0029]** В другом варианте осуществления элемент с атомным числом от 12 до 83 выбран из группы, состоящей из: железа, свинца, вольфрама и титана.

[0030] В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит магнетит и/или гематит в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов.

30 **[0031]** В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель является зернистым.

[0032] В одном из вариантов осуществления первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

35 **[0033]** В другом варианте осуществления первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена является стальной.

[0034] В другом варианте осуществления установка содержит второй экранирующий барьер, причем второй экранирующий барьер включает в себя: третью экранирующую излучение стену, окруженную первой экранирующей излучение стеной первого экранирующего барьера, и второй экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной первого экранирующего барьера и третьей экранирующей излучение стеной второго экранирующего барьера, причем второй экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 1 до 8 в количестве по меньшей мере 25 массовых процентов, причем толщина второго экранирующего барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров.

[0035] В вариантах осуществления третья экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

[0036] В другом варианте осуществления третья экранирующая излучение стена является стальной.

[0037] В других вариантах осуществления элемент с атомным числом от 1 до 8 выбран из группы, состоящей из: водорода, углерода, кислорода и бора.

[0038] В вариантах осуществления второй экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего: буру, гипс, колеманит, пластмассовый композит или известь.

[0039] В некоторых вариантах осуществления первый экранирующий барьер является несущим.

[0040] В некоторых вариантах осуществления первый экранирующий барьер является ненесущим.

[0041] В некоторых вариантах осуществления второй экранирующий барьер является несущим.

[0042] В некоторых вариантах осуществления второй экранирующий барьер является ненесущим.

[0043] Некоторые варианты осуществления могут содержать дополнительные экранирующие барьеры. Например, возможно наличие трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми и т.д. экранирующих барьеров. Некоторые или все из этих экранирующих барьеров могут быть несущими. Некоторые или все из этих экранирующих барьеров могут быть ненесущими.

Перечень фигур

[0044] Далее изобретение согласно настоящему раскрытию будет подробнее разъяснено на примерах прилагаемых чертежей, на которых аналогичные

конструкции обозначены аналогичными номерами позиций на всех из нескольких видов. Представленные чертежи не обязательно выполнены в масштабе, при этом основная цель состоит в том, чтобы проиллюстрировать принципы изобретения согласно настоящему раскрытию. Кроме того, некоторые признаки могут быть
5 представлены в увеличенном масштабе для создания детального изображения определенных компонентов.

[0045] Фиг. 1a и 1b иллюстрируют угловые распределения флюенса неэкранированных нейтронов на передней поверхности барьера, расположенного непосредственно ниже по потоку от протонного пучка с энергией 230 МэВ,
10 падающего на водную мишень (имитацию пациента протонной терапии). Центр круга представляет собой место попадания первичного пучка, при этом чем больше радиус, тем больше расстояние от оси первичного пучка. В одном случае (Фиг. 1a) изображены равные зоны, а в другом (Фиг. 1b) – равные радиусы. В общем случае следует отметить, что флюенс излучения снижается по мере роста углового
15 расстояния от первичного пучка в некоторых вариантах осуществления.

[0046] Фиг. 2 иллюстрирует относительное распределение процессов, способствующих окончательному прерыванию движения нейтронов, проходящих через двойную экранирующую стену/барьер, состоящий из магнетитового и колеманитового заполнителей, согласно одному из вариантов осуществления
20 настоящего раскрытия, по сравнению с известным барьером, состоящим из наливного бетона. В некоторых вариантах осуществления заметна разница в основном взаимодействии между материалами барьера.

[0047] Фиг. 3 иллюстрирует характеристики известной бетонной стены и модульной транспортабельной двойной барьерной стены в зависимости от
25 изменения относительных количеств разных материалов согласно одному из вариантов осуществления настоящего раскрытия. Исследование выполнено для 3-метровой суммарной толщины двойного барьера, где альфа = отношение толщин первого барьерного элемента (A) и второго, следующего, барьерного элемента (B). Так, выражение «альфа = бесконечность» соответствует несоставной
30 однокомпонентной 3-метровой стене из материала A. Размер круга графически отражает соответствующее значение дозы. Показана линия годовой дозы 2 мЗв/год, обычно используемой при проектировании надежного экрана. Небетонные материалы могут обеспечивать превосходное экранирование (т.е. снижение дозы пропущенного излучения при одинаковой толщине).

[0048] Фиг. 4 иллюстрирует характеристики известной бетонной стены и модульной транспортабельной двойной барьерной стены, состоящей из магнетита и

колеманита (круги) и гематита и колеманита (квадраты) в разных относительных количествах согласно одному из вариантов осуществления настоящего раскрытия, в зависимости от суммарной толщины барьера. В данном случае, альфа = отношение толщин первого барьера (А) и второго барьера (В). Так, выражение «альфа = бесконечность» соответствует несоставной однокомпонентной 3-метровой стене из материала А. Показана линия годовой дозы 2 мЗв/год, обычно используемой при проектировании надежного экрана. В данном случае, в некоторых вариантах осуществления альтернативные материалы также могут превосходить бетон.

[0049] Фиг. 5, 6a, 6b и 6c иллюстрируют вычисленную с помощью программы GEANT4 траекторию протонного пучка, падающего на цилиндрическую водную мишень, имитирующую пациента, с образованием излучения нейтронов и иных частиц из мишени, проходящего через двойной барьер согласно одному из вариантов осуществления настоящего раскрытия и, в конце, через смоделированное пространство детектирования для оценки дозы пропущенного излучения. Видны траектории фотонов (черные) и нейтронов (серые), поглощенных в барьерной стене. В цветной версии на Фиг. 5 прочие частицы представлены зеленым и синим цветами.

[0050] Фиг. 7 иллюстрирует модульную установку протонной терапии согласно одному из вариантов осуществления настоящего раскрытия.

[0051] Фиг. 8 изображает в разобранном виде модульную установку протонной терапии на Фиг. 7.

[0052] Фиг. 9 иллюстрирует вертикальный вид сбоку в полном разрезе неограничивающего примера многоэтажной модульной установки протонной терапии, аналогичной установке на Фиг. 7.

[0053] Фиг. 10 иллюстрирует вертикальный вид сбоку в полном разрезе неограничивающего примера многоэтажной модульной установки протонной терапии, аналогичной установке на Фиг. 7.

[0054] Фиг. 11 иллюстрирует вид в плане нижнего набора модулей, образующих верхний уровень неограничивающего примера многоэтажной модульной установки протонной терапии, аналогичной установке на Фиг. 7.

[0055] Фиг. 12 иллюстрирует вид в плане нижних уровней неограничивающего примера многоэтажной модульной установки протонной терапии, аналогичной установке на Фиг. 7. Установка построена с двумя барьерами из экранирующего материала (т.е. внутренним барьером и наружным барьером), обозначенными двумя разными заштрихованными зонами, окружающими процедурный кабинет в центре. Данная установка показана с двойным барьером из

экранирующих материалов, обозначенных двумя разными заштрихованными зонами, окружающими центральное помещение. Внутреннее пространство данной установки может быть разделено на несколько внутренних помещений, которые могут быть расположены с возможностью вмещения людей и/или оборудования, нуждающихся в экранировании. Например, в некоторых вариантах осуществления люди и/или чувствительная электроника (не показаны) могут находиться во внутренних помещениях установки и быть защищены от внешнего излучения. В качестве альтернативы, в других вариантах осуществления источники радиоактивного излучения могут находиться во внутренних помещениях установки, а люди снаружи установки могут быть защищены экранирующими стенами от радиоактивного излучения, создаваемого источниками первичного и вторичного излучения внутри установки.

[0056] Фиг. 13 иллюстрирует неограничивающие примеры факторов оптимизации экранирующей установки согласно настоящему раскрытию.

[0057] Фиг. 14 – пример функциональной схемы того, как неограничивающие примеры факторов оптимизации на Фиг. 13 могут повлиять на конструктивное исполнение примера экранирующей установки.

[0058] Фигуры являются частью настоящего описания, содержат иллюстративные варианты осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию и иллюстрируют его объекты и признаки. Кроме того, фигуры не обязательно выполнены в масштабе, при этом некоторые признаки могут быть представлены в увеличенном масштабе для создания детального изображения определенных компонентов. Кроме того, любые размеры, технические характеристики и т.п. на фигурах носят иллюстративный, а не ограничивающий, характер. Поэтому конкретные конструктивные и функциональные характеристики, раскрытые в настоящем документе, следует рассматривать не как ограничивающие, а исключительно как основу, дающую специалисту в данной области техники представление о различных возможностях использования изобретения согласно настоящему раскрытию.

Сведения, подтверждающие возможность осуществления изобретения

[0059] Помимо уже раскрытых преимуществ и улучшений, из нижеследующего описания, при его рассмотрении совместно с прилагаемыми фигурами, станут очевидны и другие цели и преимущества изобретения согласно настоящему раскрытию. В настоящем разделе детально раскрыты варианты осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию; при этом следует

понимать, что они носят исключительно иллюстративный характер, а раскрытое изобретение можно осуществить в различных формах. Кроме того, каждый из примеров, приведенных для различных вариантов осуществления согласно настоящему раскрытию, носит иллюстративный, а не ограничивающий, характер.

5 **[0060]** По всему тексту описания и формулы изобретения, следующие понятия имеют явным образом ассоциирующиеся с ними значения, если иное не следует из контекста. Выражения «в одном варианте осуществления» и «в некоторых вариантах осуществления» в настоящем документе не обязательно означают, но могут означать, одни и те же варианты. Кроме того, выражения «в
10 другом варианте осуществления» и «в некоторых других вариантах осуществления» в настоящем документе не обязательно означают, но могут означать, отличающийся вариант осуществления. Таким образом, раскрытые ниже различные варианты осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию можно легко комбинировать без отступления от объема и существа раскрытого
15 изобретения.

[0061] Кроме того, в тексте настоящего документа союз «или» является неразделительным и эквивалентен понятию «и/или», если иное явным образом не следует из контекста. Выражения «на основе», «в зависимости от», «исходя из» не несут исключаящего смысла и допускают возможность того, что в основе чего-либо
20 лежат дополнительные факторы, если иное явным образом не следует из контекста. Кроме того, по всему тексту описания слова, использованные в единственном числе, также включают в себя формы множественного числа. Предлог «в» включает в себя значения «в» и «на».

[0062] Нижеследующее описание служит по меньшей мере частично для
25 обоснования раскрытых в настоящем документе вариантов осуществления. В вариантах осуществления настоящее раскрытие относится к: (1) адронно-лучевым технологиям, например, в протонной терапии и терапии более тяжелыми ионами, а также в других областях применения, например, в энергетике, где нейтронное экранирование имеет первостепенную важность; (2) к использованию модульного
30 экранирования, в частности – в качестве способа, например, раскрытого в настоящем документе, облегчающего выбор оптимального экранирующего материала и проектирование для ослабления широкого спектра нейтронов; (3) к использованию ненесущих материалов на основе железной руды (или иных), входящих, тем не менее, в состав стены помещения; (4) к решению для
35 транспортабельного нейтронного экранирования (в отличие от поглотителя пучка

или иных стационарных средств экранирования); и (5) к использованию нескольких барьеров разного состава для дополнительной оптимизации экранирующей стены.

[0063] В вариантах осуществления настоящее раскрытие относится к модульному решению для экранирования адронов (протонов, нейтронов, пионов, тяжелых ионов и т.п.), сочетающему в себе транспортабельность и возможность оптимизации решения для экранирования радиоактивного излучения в зависимости от его типа (протонного, нейтронного, пионного и т.п.), а также для широкого и непрерывного спектра энергий.

[0064] Для оценки воздействия ионизирующего радиоактивного излучения на людей, определяют физическую дозу путем измерения энергии, поглощенной в определенной точке в небольшом испытательном объеме эквивалентной человеческой ткани среды. В случае других форм излучения, в частности – нейтронов, биологическое воздействие также зависит от типа и энергии излучения. Точно так же, как воздействие нейтронов с энергией 1 МэВ отличны от воздействия нейтронов с энергией 200 МэВ, воздействие – биологическое и иное – нейтронов с энергией 200 МэВ весьма отлично от воздействия протонов с энергией 200 МэВ или фотонов с энергией 200 МэВ. В случае нейтронов, физическую (поглощенную) дозу, выражаемую в греях и измеряемую в джоулях на килограмм, умножают на зависящий от энергии коэффициент преобразования $S_v(E)$ с получением дозы в зивертах (Зв, S_v) или эффективной дозы (E). Кроме того, если энергия излучения представляет собой распределение (спектр), то произведение $S_v(E)$ и флюенса $f(E)$ необходимо проинтегрировать по всем рассматриваемым энергиям спектра. Для свертки $S_v(E)$ и $f(E)$, $S_v(E)$ должен быть выражен в виде эквивалентной прерывной функции w_k . В публикациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ, англ. International Commission on Radiological Protection (ICRP)) 92 и 103 от 2007 года взвешивающие коэффициенты w_k для радиоактивного излучения типа k приведены в виде чисел и непрерывных кривых для некоторых энергетических зон нейтронов и иных частиц:

Взвешивающие коэффициенты в зависимости от типа и энергии частиц

- Фотоны, электроны и мюоны с любыми энергиями: $w_k = 1$
- Медленные или тепловые нейтроны с $E < 1$ МэВ: $w_k = 2,5 + 18,2 \exp(-(\ln(E))^2/6)$
- Быстрые нейтроны с E от 1 до 50 МэВ: $w_k = 5 + 17,2 \exp(-(\ln(2E))^2/6)$
- Высокоэнергетические быстрые нейтроны с $E > 50$ МэВ:
 $w_k = 2,5 + 3,5 \exp(-(\ln(0,04E))^2/6)$
- Протоны с $E > 2$ МэВ: $w_k = 2$

- Альфа-частицы, осколки деления и тяжелые ядра с любыми энергиями: $w_k = 20$ (максимальный).

[0065] Повреждение электроники отлично от повреждения, наносимого людям, однако к нему также применим зависящий от энергии спектр, в котором пик повреждения нейтронами обычно соответствует значению 1 МэВ, что явно отлично от приведенных выше значений, где наибольшие значения взвешивающих коэффициентов w_k соответствуют более высоким энергетическим диапазонам.

[0066] Вторичное нейтронное излучение является преобладающей угрозой для защиты (экранирования) на установках, где используют протонные или иных адронные пучки (т.е. с протонным или адронным излучением), например, в терапии ионами углерода, и, в общем случае, во многих областях применения различных высокоэнергетических пучков (адронных или иных). Фиг. 1а и 1b демонстрируют распределения флюенса нейтронов, возникающих в примере протонного пучка, падающего на водный фантом (имитирующий человеческую ткань) или мишень, при использовании двух разных подходов. На Фиг. 1А пространственная зона действия пучка непосредственно ниже по потоку от падающего на мишень пучка поделена на равные участки на расстоянии, соответствующем обычному процедурному кабинету. Это позволяет непосредственно определить число нейтронов на единицу площади в виде соответствующего флюенса нейтронов. На Фиг. 1В площадь каждого сегмента изменяется, однако приращение радиуса остается постоянным. Данный подход позволяет оценить степень изменения числа нейтронов по мере роста радиуса от направления первичного пучка. Однако, оба подхода дают в результате одинаковый характер изменения флюенса в зависимости от радиуса.

[0067] Энергию источника излучения, как и производственную геометрию, также можно учитывать в экранирующих применениях. Средняя энергия и флюенс нейтронов могут быть разными при разных углах падения пучка, при этом максимальная энергия нейтрона, возникающего в результате, например, падения протонного пучка с энергией 230 МэВ под углом 0 градусов (перпендикулярно барьеру), может доходить до энергии падающего протона за вычетом энергии связи, необходимой для высвобождения нейтронов из любого материала на пути пучка. По мере прохождения нейтрона через экранирующий барьер, он взаимодействует с экранирующим материалом, при этом с каждым взаимодействием происходит снижение энергии нейтрона на величину, зависящую от типа и интенсивности взаимодействия. В результате этих взаимодействий энергии нейтронов могут снизиться до уровней ~эВ, т.е. на 6 или более порядков величины относительно наивысших энергий в эВ. В результате возникает широкий

спектр энергий, охватывающий целый диапазон взвешивающих коэффициентов (w_k), речь о которых шла выше. Более того, в разных ситуациях возможно использование разных токов пучка. В радиоонкологии он обычно обусловлен дозой, предписанной пациенту для конкретной лечебной процедуры. При этом флюенс также может зависеть от энергии, как в случае систем снижения энергии, установленных в ускорителях циклотронного типа.

[0068] Существует несколько типов взаимодействий, играющих роль в ослаблении нейтронов, в том числе, помимо прочих – ионизация и фрагментация ядер. Под «ионизацией» понимают процесс отделения заряженной частицы от нейтрального атома. Фрагментация ядер – это процессы фрагментации более крупных ядер с образованием более мелких ядер.

[0069] В некоторых вариантах осуществления настоящее раскрытие относится к установке, выполненной с возможностью «неразрушающего контроля». Понятие «неразрушающий контроль» в настоящем документе относится к способам оценки свойств материала, компонента или системы без повреждения этого материала, компонента или системы.

[0070] В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 350 кВ до 1,5 МэВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 350 кВ до 1 МэВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 350 кВ до 500 кВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка частиц в энергетическом диапазоне от 350 кВ до 400 кВ.

[0071] В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 400 кВ до 1,5 МэВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 500 кВ до 1,5 МэВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с

возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 1 МэВ до 1,5 МэВ.

[0072] В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с
5 возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 400 кВ до 500 МэВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 400 кВ до 1 МэВ. В некоторых вариантах осуществления установка, выполненная с
10 возможностью неразрушающего контроля, содержит устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка в энергетическом диапазоне от 500 кВ до 1 МэВ.

[0073] Варианты осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию, помимо прочего, позволяют оптимизировать различные решения – от
15 поглощения медленных (тепловых) нейтронов (<1 МэВ) до замедления быстрых и высокоэнергетических быстрых нейтронов (от 1 МэВ до энергии пучка включительно).

[0074] В некоторых вариантах осуществления установка содержит пучок частиц в энергетическом диапазоне от 5 МэВ до 500 МэВ, расположенный в
20 пределах первого и/или второго барьеров. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника радиоактивного излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 5 МэВ до 400 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 5 МэВ до 300 МэВ.
25 В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 5 МэВ до 250 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 5 МэВ до 150 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон
30 пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 5 МэВ до 100 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 5 МэВ до 75 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в
35 пределах установки, составляет от 5 МэВ до 50 МэВ.

[0075] В некоторых вариантах осуществления установка содержит пучок или источник излучения в энергетическом диапазоне от 50 МэВ до 500 МэВ, расположенный в пределах первого и/или второго барьеров. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 100 МэВ до 500 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 150 МэВ до 500 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 250 МэВ до 500 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 300 МэВ до 500 МэВ. В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 400 МэВ до 500 МэВ.

[0076] В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, составляет от 1 МэВ до 5 МэВ.

[0077] В некоторых вариантах осуществления энергетический диапазон пучка или источника излучения, расположенного в пределах установки, не ограничен. Например, в некоторых вариантах осуществления энергия может составлять 1 кэВ. В некоторых вариантах осуществления энергия может превышать 100 ГэВ.

[0078] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложено экранирующее решение, являющееся модульным и транспортабельным. Это достигается за счет обособления экранирующего компонента создаваемой в результате экранирующей установки (корпуса) от несущего компонента. Иначе говоря, цели в части создания несущей конструкции достигаются за счет использования одного набора материалов и способов, а цели в части экранирования – за счет использования другого набора материалов и способов. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию использованы ослабляющие материалы, ранее недооцениваемые и игнорируемые из-за отсутствия у них несущих свойств. В частности, в данном случае этот факт обеспечивает возможность поглощения энергии в широком спектре, а также иные желаемые преимущества. Свойства, определяющие желательность и эффективность различных экранирующих материалов, многочисленны, зачастую несовместимы и включают в себя, помимо прочих,

например, низкую стоимость, доступность, однородность, нерастворимость, высокую плотность или высокое атомное число, низкое атомное число, минимальную регенерацию нейтронов, большое сечение захвата нейтронов, уплотняемость, простоту в использовании, низкую токсичность и низкий потенциал активации радиоактивным излучением. В вариантах осуществления настоящее раскрытие относится к созданию и генерированию адронных пучков, космических лучей и любого радиоактивного излучения, причем экран не является несущим элементом конструкции установки, что обеспечивает возможность использования самых разных зернистых экранирующих материалов.

[0079] В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель первого барьера содержит элемент (элементы) с сечением взаимодействия (мерой возможности взаимодействия, возможной единицей измерения которой является барн), достаточным для оптимизации экранирующих характеристик барьера. В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель можно определять по меньшей мере частично на основе данных, приведенных ниже в Таблице 1.

[0080] Таблица 1

Нейтронное поперечное сечение						
Элемент	Упругое		Неупругое		Захват	
	ΔЕ (МэВ)	Δσ (барн)	ΔЕ (МэВ)	Δσ (барн)	ΔЕ (МэВ)	Δσ (барн)
<i>Магнетит</i>						
¹⁶ ₈ O	0,0001-214	9,2 ⁻²⁴ 1,0 ⁻²¹	2,74-234	4,3 ⁻²⁶ -6,2 ⁻²³	0,0001-20	3,9 ⁻²⁶ -5,4 ⁻²⁶
⁵⁶ ₂₆ Fe	0,0001-224	4,05 ⁻²³ -5,4 ⁻²¹	0,85-20,3	8,4 ⁻²⁴ -1,45 ⁻²²	0,0001-20	1,15 ⁻²¹ -7,0 ⁻²¹
<i>Колеманит</i>						
¹ ₁ H	0,001-242	2,0 ⁻²¹ -3,9 ⁻²⁴			10 ⁻⁶ -20	5,3 ⁻²⁴ -2,7 ⁻²¹
¹⁰ ₅ B	10 ⁻⁶ -234	1,2 ⁻²³ -4,4 ⁻²⁰	10 ⁻⁶ -234	4,4 ⁻²⁴ -1,0 ⁻²⁰	0,01-20	8,2 ⁻³⁰ -2,7 ⁻²⁵
¹⁶ ₈ O	0,0001-214	9,2 ⁻²⁴ 1,0 ⁻²¹	2,74-234	4,3 ⁻²⁶ -6,2 ⁻²³	0,0001-20	3,9 ⁻²⁶ -5,4 ⁻²⁶
⁴⁰ ₂₀ Ca	0,001-232	7,4 ⁻²² -2,4 ⁻²³	0,1-239	1,5 ⁻²⁹ -1,3 ⁻²²	0,001-20	6,3 ⁻²⁷ -8,8 ⁻²³
<i>Бетон</i>						
¹ ₁ H	0,001-242	2,0 ⁻²¹ -3,9 ⁻²⁴			10 ⁻⁶ -20	5,3 ⁻²⁴ -2,7 ⁻²¹
¹⁰ ₅ B	10 ⁻⁶ -234	1,2 ⁻²³ -4,4 ⁻²⁰	10 ⁻⁶ -234	4,4 ⁻²⁴ -1,0 ⁻²⁰	0,01-20	8,2 ⁻³⁰ -2,7 ⁻²⁵
¹⁶ ₈ O	0,0001-214	9,2 ⁻²⁴ 1,0 ⁻²¹	2,74-234	4,3 ⁻²⁶ -6,2 ⁻²³	0,0001-20	3,9 ⁻²⁶ -5,4 ⁻²⁶
²⁷ ₁₃ Al	0,001-232	1,6 ⁻²³ -2,4 ⁻²¹	1,0-232	6,9 ⁻²⁴ -9,8 ⁻²³	0,001-20	4,3 ⁻²⁷ -9,1 ⁻²³
²⁸ ₁₄ Si	0,001-232	1,7 ⁻²³ -1,3 ⁻²¹	1,275-223	2,6 ⁻²⁵ -1,2 ⁻²²	10 ⁻⁶ -20	3,2 ⁻²⁷ -6,7 ⁻²³
⁴⁰ ₂₀ Ca	0,001-232	7,4 ⁻²² -2,4 ⁻²³	0,1-239	1,5 ⁻²⁹ -1,3 ⁻²²	0,001-20	6,3 ⁻²⁷ -8,8 ⁻²³

[0081] В Таблице 1 (выше) приведен диапазон сечений, рассматриваемых для экранирования при процедурах протонной терапии рака для разных типов механизмов поглощения энергии (реакций упругого и неупругого рассеяния и захвата). В данном случае очевидно, что бор имеет относительно большие сечения захвата нейтронов с низкими значениями в МэВ. Также полезно рассмотреть диапазон сечений упругого рассеяния для водорода в бетоне. В данном случае сечение является большим для низкоэнергетической стороны спектра, но сравнительно малым для высокоэнергетических нейтронов.

[0082] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию особое внимание уделено оптимизации нейтронного экранирования для широкого спектра энергий. Этот подход позволяет не только в полном объеме обеспечить необходимую защиту людей, но уменьшить повреждение электронных компонентов, например, в случаях, когда одиночные импульсы излучения (ОИУ, англ. single event effects (SEEs)) или отказы в результате единичного события (OPEC, англ. single event upsets (SEUs)) могут привести к неисправности в работе оборудования в процедурных кабинетах или – в других областях применения – крупных серверов ЭВМ для обслуживания автоматизированного склада или стратегического наземного электронного оборудования. ОИУ могут быть угрозой даже в зонах с низкими дозами и в большинстве случаев вызваны пролетом адронов, например, протонов или тепловых нейтронов.

[0083] Отсутствие необходимости выполнения несущей функции или даже необходимости «структурной целостности при самоопирании» (как, например, в случае бетонного блока) позволяет оптимизировать экранирующий излучение заполнитель для поглощения нейтронов в максимально полном энергетическом диапазоне, преимущественно – для нейтронов с более высокой энергией, сделав основной упор на фрагментации ядер. Остановку распространения, поглощение или иное ослабление нейтронов с разными энергиями осуществляют посредством разных процессов прерывания потока нейтронов. В некоторых вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложено экранирующее решение, делающее основной упор на задействовании фрагментации ядер (также именуемой «расщепление»), а не на процессах ионизации, связанных с использованием бетонных стен, которые в настоящее время являются отраслевым стандартом.

[0084] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложены экранирующие барьеры, выполненные с возможностью повышения уровней ослабления в диапазоне 1 МэВ с образованием специализированного радиационного барьера для электронного оборудования.

[0085] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элемент) с атомным числом от 12 до 83 (далее «элемент с большим Z»), или множественный барьер, или двойной барьер, содержащие и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z, и материал, включающий элементы с атомным числом от 1 до 8 (далее «элемент с малым Z»). Их можно использовать, например, в установке протонной терапии, где нейтроны с энергией ~1 МэВ

являются преобладающей угрозой из-за возможного радиационного повреждения электроники, при этом коэффициент качества (Q), кратный измеренной дозе, используемый при определении дозы облучения людей, выше для нейтронов с энергией ~200 МэВ. Многочисленные пропущенные низкоэнергетические («медленные» или «тепловые») нейтроны, образовавшиеся в последних нескольких дюймах экранирующей стены процедурного кабинета, не вносят значительного вклада в дозу пропущенного излучения, получаемую работниками или гражданами в учреждении, в связи с чем их обычно игнорируют в способах экранирования на основе бетона или иных стандартных способах экранирования. Однако варианты осуществления с использованием двойного барьера согласно настоящему раскрытию обеспечивают возможность поглощения во втором барьере также и низкоэнергетических нейтронов, чтобы защитить и электронику.

[0086] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 70. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 65. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 60. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 50. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 40. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 30. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 25. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 20. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен одинарный барьер, содержащий материал, включающий элемент (элементы) с атомным числом от 12 до 15.

согласно настоящему раскрытию предложен множественный барьер или двойной барьер, содержащий и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z в любом раскрытом здесь диапазоне, и материал, включающий элементы с атомным числом от 5 до 8. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен множественный барьер или двойной барьер, содержащий и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z в любом раскрытом здесь диапазоне, и материал, включающий элементы с атомным числом от 6 до 8. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен множественный барьер или двойной барьер, содержащий и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z в любом раскрытом здесь диапазоне, и материал, включающий элементы с атомным числом от 7 до 8.

[0091] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен множественный барьер или двойной барьер, содержащий и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z в любом раскрытом здесь диапазоне, и материал, включающий элементы с атомным числом от 2 до 7. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен множественный барьер или двойной барьер, содержащий и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z в любом раскрытом здесь диапазоне, и материал, включающий элементы с атомным числом от 3 до 6. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен множественный барьер или двойной барьер, содержащий и материал, включающий элемент (элементы) с большим Z в любом раскрытом здесь диапазоне, и материал, включающий элементы с атомным числом от 4 до 5.

[0092] Варианты осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию могут соответствовать требованиям к выводу из эксплуатации, так как они позволяют облегчить извлечение экранирующего материала из стен за счет того, что он представляет собой рыхлый зернистый заполнитель и за счет потенциально меньшего количества материала, подверженного долговременной активации.

[0093] Более того, поскольку подлежащий удалению потенциально радиоактивный экранирующий материал можно выбрать так, чтобы он имел существенно более короткое время распада (более короткий период полураспада), измеряемое в секундах, сутках или неделях, а не в годах или десятилетиях, а поскольку он не является несущей частью здания, общая безопасность в процессе вывода из эксплуатации будет выше. Предложенное конструктивное решение, в отличие от известных бетонных экранирующих конструкций, позволяет не

затрагивать конструкцию в целом и сделать ее безопасной для рабочих во время удаления экранирующего материала.

[0094] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложен новый способ строительства установок с адронным излучением, при котором установку строят с внутренним и наружным внешним каркасом, образующим структуру здания. Между внутренним и наружным внешними каркасами расположены контейнеры, камеры или полости, образованные между внутренними и наружными стенами, включающими в себя внешний каркас или смонтированными на нем. Эти полости заполнены экранирующим излучение 10 заполнителем, который является ненесущим. В настоящем документе понятие «ненесущий» означает «не несущий нагрузку» и даже не способный к самоопиранию, как бетонные блоки. «Ненесущий» материал не затвердевает, не образует несущую конструкцию или какую-либо опору. Так как экранирующий излучение заполнитель является ненесущим, в отличие от бетона, являющегося 15 ненесущим, состав экранирующего излучение заполнителя можно выбирать, в первую очередь, в зависимости от его возможностей в части экранирования излучения и механизма экранирования без учета факторов или потребностей в части несения нагрузки.

[0095] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель расположен между первой экранирующей излучение стеной и второй экранирующей излучение стеной с образованием первого барьера. В некоторых вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит материал, включающий элементы с большим Z , и/или иные материалы, обеспечивающие ослабление, в основном, за 20 счет фрагментации ядер. В число неограничивающих примеров элементов с большим Z в составе экранирующего излучение заполнителя входят железо, свинец, вольфрам и титан. В некоторых вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит магнетит, гематит, гетит, лимонит или сидерит. В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель находится в 30 форме скелетного материала и, таким образом, представляет собой зернистый материал.

[0096] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере один элемент с большим Z в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых 35 процентов. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере один

элемент с большим Z в количестве по меньшей мере шестьдесят массовых процентов. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере один элемент с большим Z в количестве по меньшей мере семьдесят массовых процентов. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере один элемент с большим Z в количестве по меньшей мере восемьдесят массовых процентов. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере один элемент с большим Z в количестве по меньшей мере девяносто массовых процентов. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере один элемент с большим Z в количестве по меньшей мере 95 массовых процентов.

[0097] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере пятьдесят массовых процентов железа, свинца, вольфрама, титана или их комбинаций. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере шестьдесят массовых процентов железа, свинца, вольфрама, титана или их комбинаций. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере семьдесят массовых процентов железа, свинца, вольфрама, титана или их комбинаций. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере восемьдесят массовых процентов железа, свинца, вольфрама, титана или их комбинаций. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере девяносто массовых процентов железа, свинца, вольфрама, титана или их комбинаций. В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере 95 массовых процентов железа, свинца, вольфрама, титана или их комбинаций.

[0098] В вариантах осуществления элемент (элементы) с большим Z для экранирования излучения выбирают исходя по меньшей мере частично из энергии связи ядра. Железо в его разнообразных формах (изотопах) – наиболее часто встречающийся элемент на земле, тогда как никель является двадцать вторым из наиболее часто встречающихся элементов в земной коре, не очень доступен и не

очень дешев. Железо имеет наименьшую из всех нуклидов массу на нуклон и самую высокую энергию связи ядра (8,8 МэВ на нуклон у железа-56 (^{56}Fe) – наиболее распространенного изотопа железа с распространенностью в природе 91,75%), что делает его ядро одним из наиболее сильносвязанных – его превосходят только железо-58 (^{58}Fe) (распространенность в природе 0,28%) и редкий никель-62 (^{62}Ni) (распространенность в природе 3,6%). Эти факты были учтены для эффективного экранирования. Материалы на основе железной руды имеют наибольшую энергию связи из всех легкодоступных экранирующих материалов. Это означает, что требуется (затрачивается) в среднем больше энергии, чтобы выбить нейтрон из ядра железа, чем из других ядер, благодаря чему эти материалы поглощают существенную энергию, что делает железо оптимальным и одновременно доступным экранирующим материалом для процессов фрагментации, задействуемых в некоторых вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию.

[0099] Материалы на основе железной руды усиливают естественную среду «клетки Фарадея» вмещающих их стальных модулей. Это важно в случаях применения, в которых электромагнитные поля могут создавать фоновый шум или помехи для представляющих интерес сигналов, например, в чувствительном исследовательском лабораторном оборудовании или в случаях медицинского применения, например, в магнитно-резонансной томографии (МРТ). Клетки Фарадея используют, в частности, для защиты чувствительного электронного оборудования от внешних радиочастотных помех (РЧП) или для ограждения устройств, создающих РЧП, например, сотовых и радиопередатчиков, чтобы предотвратить создание их радиоволнами помех для другого находящегося поблизости оборудования. Их также используют для защиты людей и оборудования от электрических токов, например, электростатических разрядов. Экстренная радиосвязь, обычно используемая в медицинских учреждениях, также может быть подвержена помехам.

[00100] В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 9 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 8 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 7 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 5 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого

барьера составляет от 0,5 метра до 4 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 3 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 2 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 0,5 метра до 1 метра.

[00101] В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 1 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 2 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 3 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 4 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 5 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 6 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 7 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 8 метров до 10 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 9 метров до 10 метров.

[00102] В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 2 метров до 9 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 3 метров до 8 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 4 метров до 7 метров. В некоторых вариантах осуществления толщина первого барьера составляет от 5 метров до 6 метров.

[00103] В некоторых вариантах осуществления первый барьер или второй барьер содержит множество датчиков. В других вариантах осуществления датчики выполнены с возможностью определения того, когда нужно удалить экранирующий материал из первого барьера. В вариантах осуществления датчики выполнены с возможностью определения того, что экранирующий материал в первом барьере был активирован. В вариантах осуществления датчики представляют собой таймеры, выполненные с возможностью определения того, когда нужно удалить экранирующий материал из первого барьера. В вариантах осуществления датчики настроены с возможностью измерения радиоактивного излучения, создаваемого в пределах замкнутого корпуса.

[00104] В вариантах осуществления используют второй барьер из другого экранирующего материала. В данном случае распространение

высокоэнергетических быстрых нейтронов останавливают или замедляют за счет реакций в пределах высокоплотного материала (например, материала, включающего элемент (элементы) с большим Z), однако данные реакции приводят к возникновению быстрых и/или медленных или тепловых нейтронов с более низкой энергией. В последнем случае, высокоплотные материалы не обязательно обеспечивают оптимальное экранирование, поскольку в разных энергетических диапазонах преобладают разные реакции. Для оптимального поглощения радиоактивного излучения с более низкой энергией можно использовать вторые внутренние барьеры, включающие по меньшей мере один элемент с малым Z . Второй внутренний барьер может быть создан, например, в пределах процедурного кабинета для защиты электроники. В качестве альтернативы, второй наружный барьер может быть создан, например, снаружи стены процедурного кабинета для дополнительной защиты работников.

[00105] В вариантах осуществления также опционально возможно использование множественного барьера, на обеих сторонах которого, например, высокоплотный материал заключен в оболочку из материала, включающего элементы с малым Z , как раскрыто выше, для оптимизации низкоэнергетического экранирования как внутри, так и снаружи. Данное решение можно использовать в качестве дополнения, например, в случаях, когда процедурные кабинеты примыкают друг к другу и нужно экранирование как внутри, так и снаружи, при этом внутреннее пространство одного кабинета является наружным по отношению к соседнему кабинету.

[00106] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель расположен между второй экранирующей излучение стеной и третьей экранирующей излучение стеной с образованием второго барьера. В некоторых вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит материал, включающий элементы с малым Z . В число неограничивающих примеров элементов с малым Z в составе экранирующего излучение заполнителя входят водород, углерод, кислород и бор. В некоторых вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего: буру, гипс, колеманит, пластмассовый композит или известь. В вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель находится в форме скелетного материала и, таким образом, представляет собой зернистый материал.

[00107] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию экранирующий излучение заполнитель, образующий второй барьер,

[00112] В некоторых вариантах осуществления первый барьер содержит материал, включающий элементы с малым Z , а второй барьер содержит материал, включающий элементы с большим Z . Иначе говоря, в некоторых вариантах осуществления первый барьер выполнен в соответствии с конфигурацией раскрытого в настоящем документе второго барьера, а второй барьер – в соответствии с конфигурацией раскрытого в настоящем документе первого барьера.

[00113] В вариантах осуществления по меньшей мере одно из следующего: первый и/или второй барьер содержит комбинацию материала, включающего элементы с малым Z , и материала, включающего элементы с большим Z .

[00114] В вариантах осуществления установка может содержать третий, четвертый, пятый, шестой, седьмой или более барьеров, содержащих материалы и имеющих толщины, раскрытые в настоящем документе для первого и/или второго барьеров, в зависимости от требований к установке.

[00115] В вариантах осуществления любой из барьеров (первый, второй, третий, четвертый и т.д.) может быть сформирован из множества секций. В вариантах осуществления множество секций каждого барьера может быть выполнено с возможностью удаления части экранирующего излучение заполнителя, образующего барьер. В вариантах осуществления барьер может быть образован отдельными модульными секциями, которые можно комбинировать с образованием первого и/или второго барьеров. В вариантах осуществления каждая из отдельных модульных секций выполнена с возможностью удаления после использования и замены модульной секцией, заполненной не бывшим в употреблении экранирующим излучение заполнителем. В вариантах осуществления одна или несколько отдельных модульных секций может содержать раскрытый выше датчик для указания того, когда заполнитель радиационного барьера в этой секции нужно заменить.

[00116] В вариантах осуществления в качестве датчиков для определения дозы излучения могут служить некоторые материалы. Например, пластмасса желтеет в присутствии радиоактивного излучения и темнеет при определенном уровне.

[00117] В вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию предложена экранирующая стена, содержащая оптимизированный экранирующий излучение заполнитель, которая не должна быть такой толстой, как экранирующая стена, выполненная из неоптимизированных материалов, например,

бетона, для достижения того же уровня экранирования излучения. В вариантах осуществления толщина экранирующей стены установки с протонным излучением, содержащего экранирующие стены, заполненные материалом, включающим раскрытые в настоящем документе элементы с большим Z , может быть меньше на 5% - 25% по сравнению с толщиной экранирующей стены из бетона или бетонных блоков, с обеспечением такой же или лучшей экранирующей способности. В некоторых вариантах осуществления экранирующий излучение заполнитель содержит несколько полостей, заполненных другими экранирующими излучение материалами, для создания разных барьеров экранирования в определенных направлениях, которые могут обеспечивать более индивидуальное экранирование излучения и/или более высокую эффективность в части размеров.

[00118] Фиг. 2 изображает относительное распределение процессов, способствующих окончательному прерыванию движения нейтронов, проходящих через двойную экранирующую стену/барьер, содержащий магнетитовый и колеманитовый заполнители (слева, обозначен как «двойной барьер»), согласно одному из вариантов осуществления настоящего раскрытия по сравнению с известным барьером, состоящим из наливного бетона (справа). Числовые значения были получены из моделирования методом Монте-Карло в программе GEANT4, в которой нейтроны были созданы в водной мишени, имитирующей пациента в процедурном кабинете протонной терапии.

[00119] «Моделирование методом Монте-Карло в программе GEANT4», речь о которой идет в настоящем документе, разработано для определения дозы пропущенных нейтронов как показателя ослабления нейтронов барьером. Geant4 – это общедоступный (см. <http://geant4.web.cern.ch>) набор программных средств для моделирования прохождения частиц через вещество. Сферами его применения являются: физика высоких энергий, ядерная и ускорительная физика, а также медицинские и космические исследования. Три основных справочных материала о программе Geant4 опубликованы в журнале «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A» («Ядерные приборы и методы в физических исследованиях», Раздел A), 506 (2003) 250-303, журнале «IEEE Transactions on Nuclear Science» («Труды IEEE по ядерной физике») 53, № 1 (2006) 270-278, и журнале «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A» («Ядерные приборы и методы в физических исследованиях», Раздел A), 835 (2016) 186-225.

[00120] На Фиг. 3 и 4 и в Таблице 2 представлены примеры различных исследованных материалов для составов двойной и недвойной стен. Исследование выполнено для 3-метровой суммарной толщины двойного барьера, где альфа =

отношение толщин первого барьерного элемента (А) и второго, следующего, барьерного элемента (В). Так, выражение «альфа = бесконечность» соответствует несоставной однокомпонентной 3-метровой стене из материала А.

Таблица 2				
А	2	5	7	∞
Состав барьера	Доза пропущенного излучения в зивертах (мЗв/год)			
Бетон	-	-	-	2,404
Магнетит + Колеманит	0,348	0,318	0,197	0,178
Гематит + Колеманит	0,295	0,260	0,257	0,263
Магнетит + Гипс	0,221	0,189	0,183	0,178

5 **[00121]** Фиг. 5 иллюстрирует угловые распределения флюенса неэкранированных нейтронов непосредственно ниже по потоку от протонного пучка с энергией 230 МэВ, падающего на водную мишень (имитацию пациента протонной терапии).

10 **[00122]** Процессы, перечисленные на Фиг. 2, представляют собой возможные взаимодействия, оцениваемые путем их моделирования в экранирующем барьере, при этом они зависят как от типа излученной частицы (первичной частицы), так и от вторичных частиц, с которыми они взаимодействуют. При этом Фиг. 2 была создана исключительно для спектра вторичных нейтронов, образовавшихся из протонного пучка с энергией 230 МэВ, падающего на водную
15 мишень (имитацию человека), составляющих около 91% угрозы в учреждении протонной терапии.

[00123] Моделирование протонного пучка с энергией 230 МэВ, падающего на водную мишень (имитацию пациента), в типовом бетонном барьере демонстрирует, что преобладающим процессом, прерывающим движение
20 нейтронов, в бетонном барьере является ионизация, при этом на долю электронной ионизации приходится приблизительно 60%, а на долю адронной ионизации – приблизительно 10% от общего количества процессов прерывания потока нейтронов. На долю фрагментации ядер приходится только около 16% от общего количества процессов прерывания в бетонном барьере. В этом состоит резкое
25 отличие от конструктивного решения, предложенного в вариантах осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию, в котором по большей части задействована фрагментация ядер. Поглощение энергии при фрагментации ядер больше, в связи с чем она является более эффективным способом, позволяющим использовать более тонкий и транспортабельный барьер. Мы вновь обращаем
30 внимание на данный элемент: транспортабельность и потребность в повышении

эффективности, т.е. меньшая занимаемая площадь, являются дополнительными стимулами для обособления несущего и экранирующего компонентов решения.

[00124] Предложенное техническое решение обеспечивает многонаправленное экранирование и электромагнитного, и радиоактивного излучений. Иначе говоря, лицо, стоящее за пределами процедурного кабинета радиотерапии, может быть защищено от создаваемого в нем радиоактивного излучения экранирующим барьером/стеной, или электроника в процедурном кабинете может быть защищена от радиоактивного излучения, возникающего в результате взаимодействий внутри экранирующих барьеров/стен (вторичного или рассеянного радиоактивного излучения), за счет барьера из рационально выбранного материала на внутренней стене, и/или электронные компоненты в кабинете могут быть защищены от электромагнитных сигналов или иного радиоактивного излучения, создаваемого за пределами кабинета. В решении с несколькими материалами в составе барьера, в качестве другого примера, стена между примыкающими друг к другу процедурными кабинетами может обеспечивать экранирование обоих кабинетов. Это также верно и в случае бетона, однако предложенное в настоящем документе решение обеспечивает более эффективное экранирование (следствием чего является меньшая толщина барьера и стоимость) в более широком энергетическом спектре с дополнительным преимуществом в виде эффективного экранирования высокоэнергетического нейтронного излучения с высоким флюенсом, не обеспечиваемого бетонными корпусами, проектируемыми и строящимися для сдерживания распространения пучков фотонов и электронов с более низкой энергией. В другом примере чувствительная электроника может быть размещена в экранирующем помещении меньшего размера внутри более крупной незащищенной установки или установки, в которой создавалось радиоактивное излучение. Следует отметить, что во всех вышеуказанных случаях применения решение с двойным барьером или множественными барьерами позволяет использовать несколько материалов в разных барьерах, что также обеспечивает более широкий спектр и оптимизацию ослабления. Например, для одного барьера возможно использование материалов на основе железной руды, а для другого барьера – менее плотных материалов, для оптимизации поглощения низкоэнергетических нейтронов.

[00125] На Фиг. 3 и 4, например, приведено сравнение характеристик известной бетонной стены и модульной транспортабельной двойной барьерной стены, состоящей из магнетита (MR2) и колеманита (CR2) в разных относительных количествах, согласно одному из вариантов осуществления настоящего раскрытия.

В данном случае соотношение $\alpha = L_A/L_B$, т.е. соотношение толщин первого барьера (А), с которым сталкиваются нейтроны, и второго барьера (В). Если α соответствует бесконечности, барьер состоит только из магнетита. Предусмотренное требованиями безопасности ограничение дозы пропущенного излучения в зивертах (ДПИЗ, англ. transmitted Sievert dose (TSD)) величиной 2мЗв/год обычно обуславливает минимальную допустимую толщину стены. В данном примере размер круга пропорционален дозе пропущенных в каждом случае нейтронов, т.е. ДПИЗ. Во всех случаях модульная транспортабельная стена с использованием и оптимизацией процесса поглощения нейтронов за счет фрагментации ядер является наилучшим решением. Результаты, представленные на фигуре, получены из моделирования методом Монте-Карло в программе GEANT4 и были приведены в соответствие с довольно высокой годовой клинической дозой при использовании протонного терапевтического аппарата (соответствующей величине до 5×10^{15} протонов/год). В отличие от несущей бетонной экранирующей стены, в которой ионизация является преобладающим процессом прерывания потока нейтронов, в экранирующей стене, по большей части образованной элементом (элементами) с большим Z , согласно настоящему раскрытию преобладающим процессом прерывания потока нейтронов является фрагментация ядер. Как раскрыто в настоящем документе, выбор и использование более эффективного механизма фрагментации ядер в качестве преобладающего процесса прерывания потока нейтронов позволяет обеспечить наибольшее поглощение радиоактивного излучения и продемонстрировать улучшенный, более эффективный экранирующий барьер.

[00126] Так, согласно Фиг. 3 и 4, толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя меньше толщины бетонной стены с достижением одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В вариантах осуществления толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя на 5% - 25% меньше толщины бетонной стены с достижением одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В вариантах осуществления толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя на 5% - 20% меньше толщины бетонной стены с достижением одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В вариантах осуществления толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя на 5% - 15% меньше толщины бетонной стены с достижением одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В вариантах осуществления толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя на 5% - 10% меньше толщины бетонной стены с достижением одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В

вариантах осуществления толщина барьера из экранирующего излучение
заполнителя на 10% - 25% меньше толщины бетонной стены с достижением
одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В вариантах осуществления
толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя на 15% - 25% меньше
5 толщины бетонной стены с достижением одинаковой дозы пропущенного излучения
в зивертах. В вариантах осуществления толщина барьера из экранирующего
излучение заполнителя на 20% - 25% меньше толщины бетонной стены с
достижением одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах. В вариантах
осуществления толщина барьера из экранирующего излучение заполнителя на 5%,
10%, 15%, 20% или 25% меньше толщины бетонной стены с достижением
10 одинаковой дозы пропущенного излучения в зивертах.

[00127] Фиг. 5, 6а, 6b и 6с изображают вычисленную с помощью
программы GEANT4 траекторию пучка (в черном цвете), падающего на
цилиндрическую водную мишень (имитирующую пациента) с образованием
15 вторичного излучения нейтронов и иных частиц, исходящего из мишени,
проходящего через двойной барьер согласно одному из вариантов осуществления
настоящего раскрытия и, в конце, через смоделированное пространство
детектирования. Как видно из фигур, очень малое число нейтронов проникает через
первую часть барьера; данное наблюдение побудило нас выполнить исследование
20 на предмет того, какой механизм поглощения является преобладающим в
первичном барьере.

[00128] Фиг. 7 иллюстрирует многоэтажную модульную установку 700
протонной терапии согласно одному из вариантов осуществления настоящего
раскрытия. Установка содержит множество модулей 701, выполненных с
25 возможностью совместного использования для образования установки. В вариантах
осуществления один или несколько из множества модулей 701 заполнены по
меньшей мере частично экранирующим заполнителем (не показан).

[00129] Фиг. 8 изображает в разобранном виде модульную установку
700 протонной терапии с Фиг. 7. В некоторых вариантах осуществления верхний
30 набор множества модулей 701 представляет собой двухуровневую систему с одним
набором модулей (не показан), расположенных под другим набором модулей (не
показан) одной и той же или другой толщины в зависимости от характерных для
данной площадки проектных параметров.

[00130] Фиг. 9 и 10 иллюстрируют вертикальные виды сбоку в полном
35 разрезе неограничивающего примера многоэтажной модульной установки 900
протонной терапии, схожей с установкой 700 на Фиг. 7. Данная фигура содержит

опциональную внутреннюю барьерную стену 902, расположенную между наружными стенами 903. Фиг. 10 также иллюстрирует коридоры для доступа в зоны высокой радиоактивности на каждом из нижних трех (3) уровнях.

[00131] Фиг. 11 иллюстрирует вид в плане нижнего набора модулей 701

(содержащих экранирующий материал внутреннего барьера 1104), являющихся частью верхнего уровня в неограничивающем примере многоэтажной модульной установки 1100 (и 700) протонной терапии. Изображенная установка построена с двумя барьерами из экранирующего материала (т.е. внутренним барьером 1104 и наружным барьером 1105), обозначенными двумя разными заштрихованными зонами над примером процедурного кабинета (1206 на Фиг. 12) и вокруг него. Верхний набор модулей, образующих данный верхний уровень (не показан), имеет то же экранирование, что и наружный барьер 1105. В некоторых вариантах осуществления удаляемый каркас 1106 позволяет удалять экранирующий материал через крышу для облегчения доступа к главным компонентам для установки, удаления и/или ремонта.

[00132] В некоторых вариантах осуществления внутреннее

пространство установки согласно настоящему раскрытию может быть разделено на несколько внутренних помещений, которые могут быть расположены с возможностью вмещения людей и/или оборудования, нуждающихся в экранировании. Например, в некоторых вариантах осуществления люди и/или чувствительная электроника могут находиться по внутренним помещениям установки и быть защищены от внешнего радиоактивного излучения. В качестве альтернативы, в других вариантах осуществления источники радиоактивного излучения могут находиться во внутренних помещениях установки, а люди снаружи установки могут быть защищены экранирующими стенами от радиоактивного излучения, создаваемого источниками первичного и вторичного излучения внутри установки.

[00133] Фиг. 12 иллюстрирует вид в плане нижних уровней

неограничивающего примера многоэтажной модульной установки 1200 протонной терапии. Фиг. 12 содержит внутренний барьер 1204, наружный барьер 1205, входной лабиринт (коридор) и процедурный кабинет (обозначенный белым пространством) с устройством 1206 доставки протонов в нем.

[00134] В одной форме согласно настоящему раскрытию, установка с

адронным излучением построена из нескольких заводских модулей, построенных за пределами площадки, отправленных на площадку и собранных на площадке строительства с образованием несущего внешнего каркаса корпуса установки с

адронным излучением, а также всех необходимых неэкранирующих пространств (медицинских, технических и т.п.). Экранирующие модули предпочтительно изготовлены в заводских условиях со всеми желаемыми внутренними конструкциями здания и с использованием известных способов модульного строительства. При этом, с учетом особых потребностей в экранировании излучения установки с адронным излучением, каждый экранирующий модуль имеет несущий внешний каркас, обычно стальной, состоящий из нескольких панелей. Некоторые из сторон каждого модуля состоят из металлических стен («панелей»), а другие оставлены открытыми. Панели на разных модулях ориентированы так, чтобы при сборке модулей друг с другом указанные панели можно было совместить с панелями в расположенных выше или ниже модулях и, опционально, с модулями с каждой из сторон с образованием относительно сплошных внутренних и наружных стен, обрамляющих полые пространства. Полые пространства впоследствии заполняют выбранным экранирующим излучение материалом. Несущие каркасы указанных разных модулей, будучи соединены друг с другом, совместно образуют внутренний и наружный внешние каркасы здания, а панели, включающие в себя модули или смонтированные на них, совместно образуют внутренние и наружные стены, образующие полые пространства, содержащие экранирующий излучение наполнитель. Между внутренними и наружными стенами возможно наличие промежуточных стен, построенных таким же образом с возможностью создания нескольких полых пространств, которые могут быть заполнены экранирующими материалами разных типов. Модули также содержат материалы внутренней отделки, относящиеся к функциональным зонам установки, например, приемному покою, посту управления, процедурному кабинету, содержащему стол для пациента и гентри для устройства протонной терапии (например) и т.п. Характеристики установки радиотерапии, построенной модульным способом с одинарным барьером из зернистого экранирующего материала, подробнее раскрыты в патенте США № 6,973,758, выданном Зейку (Zeik) с соавторами и патенте США № 9,027,297, выданном Лефкусу (Lefkus) с соавторами, включенных в настоящую заявку посредством отсылки, при этом данное решение можно использовать для создания установки с адронным излучением, соответствующим образом модифицировав схемы расположения внутренних пространств и экранирующих стен, число стен и, как следствие, число полых пространств, и экранирующие материалы, толщины и материалы для создания желаемой конфигурации установки с адронным излучением.

[00135]

В одном усовершенствованном варианте экранирующая стена может быть выполнена с обособленными отсеками с возможностью их заполнения разными экранирующими излучение заполнителями. Обособленные отсеки могут выполнять несколько функций. Например, создание обособленных отсеков в толще экранирующей стены позволяет создать многослойную стену с внутренним барьером («внутренний» означает «ближайший к источнику радиоактивного излучения») с одним типом заполнителя, оптимизированным для одного типа ослабляющего взаимодействия, и наружным слоем («наружный» означает «расположенный дальше от источника радиоактивного излучения»), оптимизированным для другого типа ослабляющего взаимодействия. Например, внутренний барьер может служить для замедления высокоэнергетических нейтронов до состояний с более низкой энергией, а наружный барьер – для поглощения более медленных нейтронов с более низкой энергией. Аналогичным образом могут быть созданы дополнительные барьеры с образованием в результате двух, трех, четырех или более экранирующих барьеров. Как разъяснялось выше, ни для одного барьера экранирующий излучение заполнитель не является несущим, благодаря чему диапазон материалов может быть широким. Данное решение позволяет создать устройство экранирования широкого энергетического спектра, задействуя, в каждом материале, преобладающий процесс, соответствующий конкретному случаю применения (типу радиоактивного излучения и энергетическому диапазону).

[00136]

Большинство полупроводниковых электронных компонентов подвержены радиационному повреждению. Длительное воздействие остаточного ионизирующего излучения, например, нейтронов, может разрушать электронику медицинского оборудования на установках терапии частицами. На некоторых медицинских установках замену съемочных камер на приборах с зарядовой связью (ПЗС, англ. charge-coupled device (CDD)) производят ежемесячно, а другие покупают дорогостоящее защищенное от радиоактивного излучения оборудование, лучше приспособленное к этим неблагоприятным условиям. Эту проблему можно решить за счет оптимизации одного или нескольких экранирующих барьеров для уменьшения остаточного ионизирующего радиоактивного излучения. Примером может служить вторичный барьер с заполнителем, содержащим богатый водородом материал, например, гипс (оптимальный для замедления быстрых нейтронов), богатый бором материал, например, буру или колеманит (оптимальные для захвата медленных нейтронов). Данный способ, будучи предназначен для адронной терапии, также применим для электронных компонентов в самых разных условиях

излучения, в том числе – условий низкоуровневого излучения, например, крупных серверов ЭВМ для обслуживания автоматизированного склада или стратегического наземного электронного оборудования, когда даже земные или космические лучи могут привести к нарушению безопасности из-за ОИУ. Нейтроны, протоны и пионы – частицы, приводящие к постепенному ухудшению работы электроники.

[00137] В качестве альтернативы или в дополнение к созданию перегородок в толще экранирующей стены, т.е. внутреннего и наружного барьеров, могут быть созданы поперечные перегородки в экранирующем заполнителе. Одна из функций поперечных перегородок состоит в обеспечении возможности избирательного удаления секций экранирующей стены независимо от прочих секций. В частности, это обеспечивает преимущество для зон наибольшего воздействия радиоактивного излучения, которые могут быть активированы. Создание обособленных камер, содержащих заполнитель, в зонах возможной активации позволяет регулярно тестировать эти обособленные камеры и, в случае их активации, удалять их и утилизировать без необходимости демонтажа стены, в состав которой они входят, целиком.

[00138] Для случаев, когда активированные секции проще удалять крупными блоками/секциями, в заполнитель может быть введен жидкий строительный раствор для отверждения заполнителя в наиболее удобном размере, тем самым обеспечивая возможность наиболее экономичного удаления, транспортировки и утилизации. Для облегчения ввода жидкого строительного раствора в секциях могут быть выполнены каналы текучей среды.

[00139] В разные секции экранирующей стены также могут быть заделаны датчики излучения. Датчики излучения выполнены с возможностью определения уровня радиоактивного излучения, достигающего каждой секции стены, и определения того, была ли та или иная секция активирована и нужно ли ее удалить. Предложенный способ с использованием рыхлого скелетного материала пригоден для данного типа устройств, так как обеспечивает возможность доступа к данным контрольно-измерительным приборам и их удаления для техобслуживания, модернизации и ремонта. Это невозможно в случае заделки датчиков в наливной бетон без каналов для прокладки кабелей к контрольно-измерительным приборам, создающих нежелательные полости в экране.

[00140] Панели, образующие самые внутренние стены, потолок и пол, отделяющие экранирующий излучение заполнитель помещения корпуса, могут быть выполнены из стали или иного токопроводящего материала с возможностью создания фактически клетки Фарадея вокруг центрального помещения корпуса или

там, где это необходимо или желательно. Клетка Фарадея обеспечивает преимущество, состоящее в предотвращении помех для связи или поступления шума в электрическую схему какого-либо типа в области протонного корпуса, в том числе – в ускорителе протонов, относящихся к нему электрических и электронных компонентах и всех прочих вычислительных, электрических и электронных устройствах на всей территории установки и непосредственно по соседству с ней.

[00141] Модели экранирующих свойств двойного барьера для учреждения протонной терапии согласно настоящему раскрытию были созданы для разных толщин стены. Смоделированный барьер согласно настоящему раскрытию представлял собой двойной барьер с внутренним барьером из магнетита (барьер А) и наружный барьер из колеманита (барьер В). Были смоделированы четыре соотношения толщин внутреннего магнетитового барьера и наружного колеманитового барьера (α =барьер А/барьер В): 2, 5, 7 и бесконечность (последнее соответствует одинарному барьеру из магнетита при отсутствии барьера из колеманита). Сравнение с результатами моделирования для бетонной стены сравнимой толщины показали существенное превосходство характеристик всех смоделированных барьеров согласно настоящему изобретению над характеристиками бетонной стены. Было установлено, что 3-метровая толщина смоделированного барьера (в том числе – барьера только из магнетита) может обеспечить достаточное экранирование протонов с энергией пучка 230 МэВ с возможностью снижения дозы пропущенного излучения в зивертах до значения, существенно ниже целевого значения 2мЗв/год, как проиллюстрировано на Фиг. 3 и 4.

[00142] В вариантах осуществления, изобретение согласно настоящему раскрытию разработано с возможностью упрощения его удаления по окончании срока службы. Вывод из эксплуатации радиационных установок включает в себя безопасный вывод установки из работы и устранение или снижение остаточной радиоактивности до уровня, позволяющего прекратить действие лицензии на использование источника радиоактивного излучения с выдачей разрешения на использование имущества без ограничений или – в худшем случае – с соблюдением установленных ограничивающих условий.

[00143] В вариантах осуществления, изобретение согласно настоящему раскрытию обеспечивает возможность более быстрого и менее затратного вывода из эксплуатации, поскольку весь радиоактивный материал можно извлечь из камер путем отсасывания или отверждения в них с последующим удалением в форме блоков удобного размера. В некоторых вариантах

осуществления зернистый характер материала позволяет отделить активированные компоненты от неактивированных. В некоторых вариантах осуществления по меньшей мере некоторые из отделенных материалов можно сбросить. В некоторых вариантах осуществления по меньшей мере некоторые из отделенных материалов можно поместить на хранение. В некоторых вариантах осуществления по меньшей мере некоторые из отделенных материалов можно утилизировать. В некоторых вариантах осуществления по меньшей мере некоторые из отделенных материалов можно продать.

[00144] Специалисту в данной области техники будет понятно, что любое из подходящих технических решений, раскрытых в настоящем документе и включенных в него, можно использовать для реализации нескольких примеров аспектов раскрытия. Согласно одному аспекту, предложен способ проектирования и строительства установки, экранирующей излучение. На начальном этапе определяют предмет защиты. Это, например, могут быть люди, электроника, или и те, и другое. Определив предмет (предметы), подлежащий экранированию, определяют рассматриваемый энергетический диапазон нейтронов, интенсивность радиоактивного излучения и максимально допустимую дозу. Как сказано выше, эти величины различны для людей и электроники.

[00145] На следующем этапе определяют, где будут расположены предметы, подлежащие экранированию (люди или оборудование), относительно источника радиоактивного излучения. Предмет (предметы), подлежащий экранированию, может быть расположен на одной стороне с источником первичного излучения, на противоположной стороне или на обеих сторонах. По результатам определения делают выбор между применением решения с простым (однонаправленным) многослойным барьером или решением с двунаправленным барьером.

[00146] Далее, исходя из энергетического диапазона нейтронов и направления, в котором радиоактивное излучение будет проходить через барьер, оценивают и определяют тип взаимодействия для ядерного ослабления, наиболее эффективный для радиоактивного излучения этого диапазона и типа, и выбирают экранирующий материал, состав которого может обеспечить оптимальный тип взаимодействия для ядерного ослабления. Цель состоит в том, чтобы эффективно задействовать свойство материала для увеличения относительной доли наиболее эффективного из взаимодействий для ядерного ослабления, т.е. довести ослабление до максимума за счет выбора наиболее эффективного способа (эффективных способов) ослабления и использования материалов, позволяющих

наиболее эффективно задействовать этот способ (эти способы). Выбрав материал и, следовательно, зная его характеристики в части ядерного ослабления, используют модель для вычисления толщины стены, нужной для достижения уровня ослабления, необходимого для приведения дозы пропущенного радиоактивного излучения к значению ниже желаемого порога.

[00147] Способ можно выполнять повторно в отношении барьеров с дополнительными материалами, при этом расчетными параметрами являются тип экранирующего материала (обуславливающий его экранирующие характеристики), толщина экранирующего барьера (барьеров) и порядок/схема расположения барьеров, если их больше одного. Цель состоит в оптимизации экранирующих материалов в зависимости от характеристик предмета, подлежащего экранированию (человека и/или электроники), и местоположения (местоположений) предмета или предметов, подлежащих экранированию, относительно источника радиоактивного излучения и барьера (барьеров) экранирующей стены.

[00148] Возможно использование процесса последовательных приближений, при котором свободными переменными могут быть одна или несколько из следующих: (а) число барьеров; (b) выбранный материал для каждого барьера; (с) плотность материала для каждого барьера (на которую может влиять уплотнение); (d) толщина каждого барьера, (е) порядок или схема расположения каждого барьера, если их больше одного, и (f) допустимая активация. Несмотря на то, что теоретически можно выбрать любое число материалов, предполагается, что материалы будут выбирать, в первую очередь исходя из их способности предпочтительно обеспечивать наиболее желаемые или эффективные взаимодействия для ядерного ослабления, что, как раскрыто выше, зависит от выбранного назначения, т.е. характеристик рассматриваемого радиоактивного излучения, а также предмета, подлежащего защите/экранированию.

[00149] Более того, целью процесса выбора материалов в некоторых вариантах осуществления является выбор относительно недорогих и/или легкодоступных материалов, что дополнительно ограничивает круг выбранных материалов. Таким образом, после того, как будет полностью понятна угроза для экранирования, логичным следующим этапом является определение стоимости, доступности и пригодности доступных экранирующих материалов. Например, в ситуации, когда было определено, что трехслойная стена является наилучшим решением, и были установлены желаемые свойства каждого слоя, в первую очередь выбирают три материала, подходящие для данной задачи, т.е. оптимальные для конкретного типа взаимодействия для ядерного ослабления,

которые также доступны в достаточном количестве и недороги. Далее, определив число барьеров и материал для использования в каждом барьере, вычисляют суммарную толщину стены для всех барьеров в комбинации и создают модели свойств в части ослабления радиоактивного излучения и эффектов, используя
 5 разные относительные толщины разных барьеров, составляющих экранирующую стену. Модели могут быть оптимизированы для нахождения наиболее эффективных относительных толщин разных барьеров для данной суммарной толщины стены, при этом суммарную толщину стены можно изменять (и повторять процесс последовательных приближений), если это будет нужно по результатам
 10 моделирования.

[00150] В вариантах осуществления изначально могут быть выбраны разные толщины стены, а процесс оптимизации соотношений относительных толщин каждого барьера можно повторять.

[00151] В других вариантах осуществления можно выбрать разные
 15 исходные материалы и повторять указанный процесс для оптимизации параметров строительства стены для разных экранирующих материалов. Данный способ может быть наиболее полезен в ситуациях, когда желательно минимизировать занимаемую зданием площадь, например, из-за высокой стоимости земли или ограничений на площадке. Более дорогой экранирующий материал может
 20 обеспечивать лучшие свойства и результаты в части ядерного ослабления для той или иной угрозы для экранирования. Поэтому при его использовании суммарная толщина экранирующей стены может быть меньше, чем при использовании менее дорогого экранирующего материала, что позволяет уменьшить суммарную занимаемую установкой площадь. В подобном случае, дополнительные расходы,
 25 связанные с использованием более дорогого экранирующего материала, могут быть нивелированы за счет снижения расходов на землепользование и/или большей свободы выбора проектных решений.

[00152] В еще одном варианте осуществления изобретения согласно настоящему раскрытию установка спроектирована для защиты электронных устройств или оборудования, на которые может отрицательно повлиять радиоактивное излучение. В данном варианте установка содержит множество электронных устройств или иное оборудование, на которые может отрицательно повлиять радиоактивное излучение, а не устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка.

[00153] С учетом вышесказанного то, что экранирующий материал не является частью несущей конструкции установки и его можно выбирать исходя

исключительно из его свойств экранирования излучения, а также стоимости и доступности, обеспечивает новую и беспрецедентную свободу выбора проектных решений. Свободой выбора проектных решений можно пользоваться в соответствии с настоящим раскрытием для создания конструкций экранирующих установок в таких местах, по такой стоимости и с таким темпом строительства, которые ранее не были возможны.

[00154] В некоторых вариантах осуществления в основе оптимизации установки могут лежать три ключевых фактора. В их число входит, помимо прочего, по меньшей мере одно из следующего: экранирующие характеристики, пространство для экранирования или стоимость экранирования. Неограничивающий пример решения по оптимизации, в основе которого лежат факторы стоимости экранирования, пространства экранирования и экранирующих характеристик, приведен на Фиг. 13. Пример функциональной схемы того, как неограничивающие примеры факторов оптимизации на Фиг. 13 могут повлиять на конструктивное исполнение примера экранирующей установки, дан на Фиг. 14.

[00155] В некоторых ситуациях экранирующие характеристики являются основным фактором при проектировании установки. Фактор экранирующих характеристик включает в себя оптимизацию для типа угрозы и желаемого уровня ослабления. Следующим фактором является располагаемое пространство для экранирования. Фактор располагаемого пространства для экранирования включает в себя оптимизацию располагаемого физического пространства для достижения решения. Третьим фактором является стоимость экранирования. Фактор стоимости экранирования включает в себя оптимизацию расходов, необходимых для достижения приемлемых характеристик.

[00156] В некоторых вариантах осуществления модульное решение также обеспечивает возможность разных уровней экранирования в разных зонах, например, более сильного ослабления в зонах воздействия повышенного радиоактивного излучения или с большей заполненностью.

[00157] В некоторых ситуациях экранирующие характеристики являются основным фактором при проектировании установки. В основе фактора экранирующих характеристик лежит создание наиболее эффективного решения для ослабления нейтронов и иных субатомных частиц. В следующем неограничивающем примере стоимость не рассматривается. В данном примере чувствительное электронное оборудование необходимо защитить от нейтронов и иных субатомных частиц. Для сохранения целостности электроники с течением времени доза пропущенного излучения в зивертах (мЗв/год) должна составлять

0,20, что в десять раз меньше того, что люди могут безопасно поглотить. Исходя из потребности в защите оборудования, необходимо выбрать решение, обеспечивающее наилучшие характеристики. В число дополнительных соображений входит величина располагаемого пространства. Пространство является ограничением для физического барьера. Чем меньше располагаемая площадь, тем более эффективным должен быть барьер и тем более высокие характеристики он должен иметь. Характеристики барьера можно оптимизировать за счет выбора материалов, их чистоты, уплотненности и объема. Как сказано выше, в данном примере стоимость не будет являться фактором. В некоторых ситуациях фактор характеристик может включать несколько субфакторов, которые можно оптимизировать. Например, можно оптимизировать экранирующие характеристики исходя, помимо прочего, из следующих нескольких аспектов: фотоны, нейтроны, протоны или источник иных угроз.

[00158] В некоторых ситуациях пространство для экранирования является основным фактором при проектировании установки. Пространство для экранирования может быть фактором тогда, когда существующее местоположение физически ограничивает допустимую величину располагаемой площади. В неограничивающем примере для размещения нового оборудования выбран внутренний двор установки из-за близости к существующим оперативным подразделениям и/или даже нежелательности нахождения на виду. Пространство для экранирования составляет менее 3 метров, а экранирующие характеристики – 2,00 мЗв/год. Такое ограниченное пространство для экранирования не является достаточной площадью для традиционных способов экранирования с использованием бетона и блоков, при этом трудно организовать логистическое обеспечение для укладки бетона. Поэтому основным фактором является эффективность экранирования. Если общая располагаемая площадь для барьера известна, следующим фактором станут экранирующие характеристики, т.е. то, какие материалы могут обеспечить достаточную защиту в этом ограниченном пространстве.

[00159] В некоторых вариантах осуществления стоимость не является основным фактором. В некоторых ситуациях фактор пространства для экранирования может включать в себя несколько субфакторов, которые можно оптимизировать. Например, можно оптимизировать пространство для экранирования, исходя из нескольких аспектов, в том числе, помимо прочего, ограничений по вертикали или горизонтали или общего объема.

[00160] В некоторых ситуациях основным фактором при проектировании установки является стоимость экранирования. Стоимость экранирования может быть фактором для создаваемых с нуля коммерческих площадок. Там может не быть ограничений по пространству, а характеристики могут быть типовыми. В неограничивающем примере строят новую установку с медицинским устройством, обычно используемым в протонной терапии. Заказчику-университету нужно внедрить как можно менее затратное решение. Располагаемая земля не является проблемой, какие-либо особые требования по ослаблению отсутствуют. Для проекта имеется несколько акров открытого пространства. Ограничения по мощности дозы также умеренные – 2,00 мЗв/год. Стоимость экранирования может быть основным фактором, а стандартные характеристики – вторичным фактором. Экранирующие материалы можно выбирать исходя из стоимости приобретения, на которую влияет близость к площадке. В некоторых вариантах осуществления существует компромисс между чистотой и объемом. В некоторых вариантах осуществления больший объем для того же пространства означает более высокие расходы на транспортировку. Поэтому располагаемое пространство для экранирования может не быть фактором. В некоторых ситуациях фактор стоимости экранирования может включать в себя несколько субфакторов, которые можно оптимизировать. Например, можно оптимизировать стоимость экранирования исходя из нескольких аспектов, в том числе, помимо прочего, по меньшей мере одного из следующего: начальная экономия, экономия в долгосрочной перспективе или экономия времени.

[00161] В рамках указанных трех факторов имеются возможности для оптимизации без отступления от технических расчетов. В зависимости по меньшей мере частично от типа и энергии излучения, которое подлежит экранированию, можно задействовать и сбалансировать разные взаимодействия. В некоторых вариантах осуществления оптимизацию можно осуществлять с использованием алгоритма статистического взвешивания. Неограничивающим величинам, например, стоимости материала или размеру барьера, можно присвоить массив значений, посредством которого алгоритм оптимизации может повторно взвешивать результаты для определения оптимизированного решения. В вариантах осуществления возможно использование байесовской оптимизации взвешенных вычислений путем выборки по методу Монте-Карло для просмотра множества вариантов со статистической строгостью в отличие от обычных алгоритмов экранирования.

[00162] Гибкость раскрытых в настоящем документе способов позволит проектировщикам, с помощью алгоритмов и, возможно, машинного обучения и искусственного интеллекта, оценивать различные сценарии достижения поставленной цели. Данный способ предусматривает использование диапазона материалов, физического пространства, типов радиоактивного излучения (фотонов, атомов или субатомных частиц), конкретных энергий и/или диапазона энергий.

[00163] Значения указанных энергий не ограничены. Например, в некоторых вариантах осуществления энергии могут составлять всего лишь 1 кэВ. В некоторых вариантах осуществления энергии могут достигать 1000 ГэВ. Желаемые характеристики также можно оптимизировать, используя прогнозную аналитику. Данные способы, в некоторых вариантах осуществления, позволяют получить результаты, значительно отличающиеся от известного решения для стандартного строительства, которое может включать ограниченное число переменных, путем простого увеличения объема и/или использования более плотных скелетных материалов.

Неограничивающий пример: Установка протонной радиотерапии

[00164] В вариантах осуществления на первом этапе создания установки протонной терапии рассматривают стену процедурного кабинета, защищающую радиотерапевтов от радиоактивного излучения, используемого для лечения пациента, лежащего на койке внутри примыкающего процедурного кабинета. Диапазон энергии нейтронов в данном случае применения: от близкой к нулю МэВ до энергии пучка за вычетом энергии связи экранирующего материала (материалов). Максимально допустимая доза пропущенного излучения в зивертах для радиотерапевта составляет 2 мЗв/год («пороговая доза пропущенного излучения в зивертах»).

[00165] Терапевты работают за пределами процедурного кабинета во время доставки пучка, поэтому задача проектирования должна учитывать нейтроны, поступающие из кабинета во время доставки пучка через барьер в зоны, где может работать терапевт (могут работать терапевты). (Распространение протонов можно быстро и просто остановить, поэтому они не являются фактором, за исключением того, что они порождают нейтроны до того, как будут остановлены.). Для данного случая применения было установлено, что оптимальное экранирование можно обеспечить, задействовав процессы фрагментации ядер посредством материала на основе железной руды. Согласно данному примеру, снижение дозы пропущенного излучения в зивертах (ДПИЗ) ниже пороговой дозы пропущенного излучения в зивертах может обеспечить использование одинарного барьера из такого

материала. В данном случае необходимая толщина барьера может быть меньше, чем при использовании бетона, обычно используемого из-за комбинации несущих и экранирующих свойств.

[00166] Возможно использование дополнительных барьеров, состоящих из разных экранирующих материалов, с раскрытыми выше относительными толщинами нескольких барьеров, оптимизированных, как раскрыто выше. Использование нескольких барьеров из материала возможно во всех экранирующих стенах установки или только в избранных местах. Места для дополнительных экранирующих барьеров могут быть выбраны исходя из ожидаемого спектра радиоактивного излучения, попадающего в разные зоны экранирующей стены, так как на установке терапии частицами спектр радиоактивного излучения не является единообразным во всех направлениях. Места для дополнительных экранирующих барьеров также могут быть выбраны исходя из того, кто или что находится по другую сторону барьера, например, чувствительная электроника или приемный покой с неконтролируемой высокой заполненностью. Экран большей толщины, например, можно разместить так, чтобы он был обращен прямо навстречу направлению пучка (который может образовывать ориентированную по вертикали круговую «полосу» вокруг гентри, совершающей поворот на полные 360 градусов).

[00167] Дополнительные барьеры можно добавлять и/или оптимизировать исходя из местоположения электроники в процедурном кабинете. Для данной оптимизации моделируют обратно-рассеянное излучение (излучение, рассеянное обратно в кабинет после поступления высокоэнергетических нейтронов (также именуемых «вторичное» или «рассеянное радиоактивное излучение») в экранирующую стену) и выбирают внутренние барьеры из экранирующего материала для ослабления излучения, которое иначе было бы рассеяно обратно в кабинет и повредило бы электронику.

[00168] Выбрав экранирующие материалы, моделируют характеристики комбинированного радиационного экрана методом последовательных приближений, как разъяснялось выше, для нахождения толщин разных барьеров, необходимых для достижения проектного параметра (т.е. пороговой дозы пропущенного излучения в зивертах, получаемой терапевтом, ниже 2мЗв/год и/или установленной максимально допустимой дозы, получаемой оборудованием).

[00169] Существующие в данное время модели показали, что магнетит является желаемым экранирующим материалом для данного типа протонных установок. Гематит также был признан приемлемым и может быть менее дорогим.

[00170] Несмотря на то, что в настоящем документе приведены
5 примеры осуществления и случаи применения настоящего раскрытия, в том числе – описанные выше и представленные на прилагаемых примерах фигур, следует понимать, что раскрытие не ограничено этими примерами осуществления и применения, а также тем, как эти примеры осуществления и применения действуют, или тем, как они описаны в настоящем документе. Среднему специалисту в данной
10 области техники будет очевидно, что в примеры осуществления могут быть внесены многочисленные изменения и модификации, а также то, что возможно их применение не только в медицине, но и, например, в исследованиях, в энергетике или на установках стратегического назначения. В объем раскрытия может входить любое устройство, конструкция, способ или функциональная возможность, при
15 условии, что в результате будет получено устройство, конструкция или способ без отступления от объема одного из пунктов формулы изобретения, который патентное ведомство примет на основании данной или родственной заявки на патент.

Несмотря на то, что были описаны несколько вариантов осуществления
20 изобретения согласно настоящему раскрытию, следует понимать, что они носят исключительно иллюстративный, а не ограничивающий, характер, а также то, что средним специалистам в данной области техники смогут прийти на ум множество модификаций. Кроме того, указанные несколько этапов можно выполнять в любом желаемом порядке (при этом, по желанию, можно добавлять и/или исключать
25 любые этапы).

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Установка, содержащая:

а) устройство, выполненное с возможностью генерирования пучка энергии излучения в энергетическом диапазоне от 5 МэВ до 500 МэВ,

б) первый экранирующий барьер, окружающий устройство, причем толщина экранирующего барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров, причем экранирующий барьер включает в себя:

i) первую экранирующую излучение стену, окружающую устройство;

ii) вторую экранирующую излучение стену, окружающую первую экранирующую излучение стену;

iii) экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной и второй экранирующей излучение стеной,

причем экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 12 до 83 в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов.

2. Установка по п. 1, в которой элемент с атомным числом от 12 до 83 выбран из группы, состоящей из: железа, свинца, вольфрама и титана.

3. Установка по п.п. 1 или 2, в которой экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов: магнетит или гематит в зависимости от суммарного веса экранирующего излучение заполнителя.

4. Установка по п. 3, в которой экранирующий излучение заполнитель является зернистым.

5. Установка по п.п. 1-4, в которой энергетический диапазон выбран из группы, состоящей из диапазонов: от 5 МэВ до 70 МэВ, от 5 МэВ до 250 МэВ и от 5 МэВ до 300 МэВ.

6. Установка по п.п. 1-5, в которой первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

5 7. Установка по п.п. 1-6, в которой первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена содержит сталь.

8. Установка по п.п. 1-7, дополнительно содержащая второй экранирующий барьер, причем второй экранирующий барьер включает в себя:

10 третью экранирующую излучение стену, окружающую вторую экранирующую излучение стену первого экранирующего барьера; и

второй экранирующий излучение заполнитель между второй экранирующей излучение стеной первого экранирующего барьера и третьей экранирующей излучение стеной второго экранирующего барьера,

15 причем второй экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 1 до 8 в количестве по меньшей мере 25 массовых процентов,

причем толщина второго экранирующего барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров.

20 9. Установка по п. 8, в которой третья экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

10. Установка по п. 8, в которой третья экранирующая излучение стена содержит сталь.

25

11. Установка по п. 8, в которой элемент с атомным числом от 1 до 8 выбран из группы, состоящей из: водорода, углерода, кислорода и бора.

30 12. Установка по п. 8, в которой второй экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего: буру, гипс, колеманит, пластмассовый композит или известь.

13. Установка по п.п. 1-12, в которой пучок энергии излучения содержит частицы и/или фотоны.

35

14. Установка по п. 13, в которой частицы представляют собой адроны.

15. Установка по п. 14, в которой адроны включают в себя по меньшей мере одно из следующего: протоны, нейтроны, пионы или тяжелые ионы.

- 5 16. Установка, содержащая:
- а) множество электронных устройств,
- б) первый экранирующий барьер, окружающий множество электронных устройств, причем толщина экранирующего барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров,
- 10 причем экранирующий барьер включает в себя:
- i) первую экранирующую излучение стену, окружающую множество электронных устройств,
- ii) вторую экранирующую излучение стену, окружающую первую экранирующую излучение стену,
- 15 iii) экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной, причем экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 12 до 83 в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов.

- 20 17. Установка по п. 16, в которой элемент с атомным числом от 12 до 83 выбран из группы, состоящей из: железа, свинца, вольфрама и титана.

18. Установка по п.п. 16 или 17, в которой экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего в количестве по меньшей мере пятьдесят массовых процентов: магнетит или гематит в зависимости от суммарного веса экранирующего излучение заполнителя.
- 25

19. Установка по п.п. 16-18, в которой экранирующий излучение заполнитель является зернистым.
- 30

20. Установка по п.п. 16-19, в которой первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

- 35 21. Установка по п.п. 16-20, в которой первая экранирующая излучение стена и/или вторая экранирующая излучение стена содержит сталь.

22. Установка по п.п. 16-21, дополнительно содержащая:

второй экранирующий барьер, причем второй экранирующий барьер расположен между множеством электронных устройств и первым экранирующим барьером, причем толщина второго барьера составляет от 0,5 метра до 6 метров, причем второй экранирующий барьер включает в себя:

третью экранирующую излучение стену, окруженную первой экранирующей излучение стеной первого экранирующего барьера, и

второй экранирующий излучение заполнитель, расположенный между первой экранирующей излучение стеной первого экранирующего барьера и третьей экранирующей излучение стеной второго экранирующего барьера, причем второй экранирующий излучение заполнитель содержит элемент с атомным числом от 1 до 8 в количестве по меньшей мере 25 массовых процентов.

23. Установка по п. 22, в которой третья экранирующая излучение стена содержит панели, смонтированные на несущем внешнем каркасе.

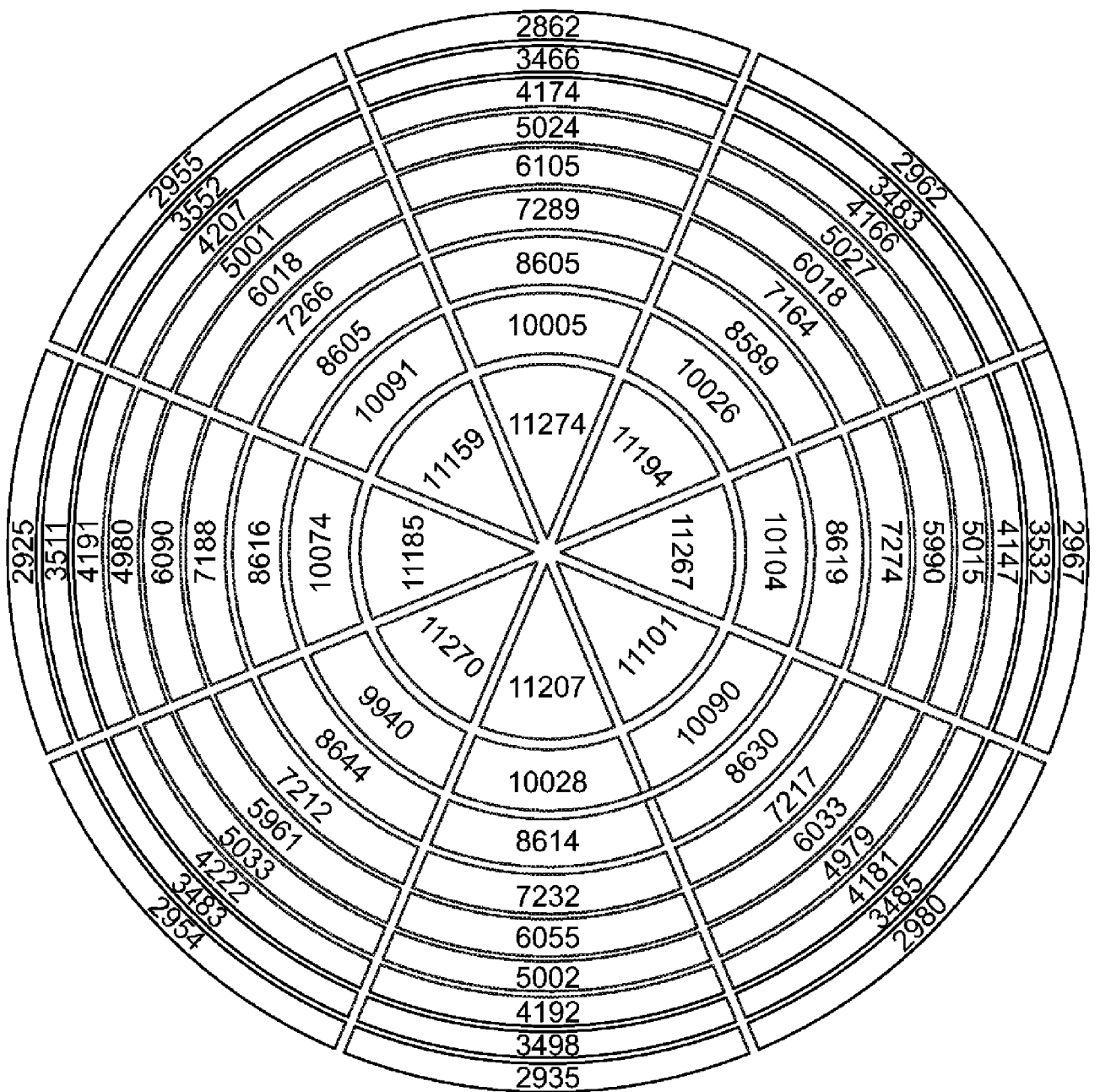
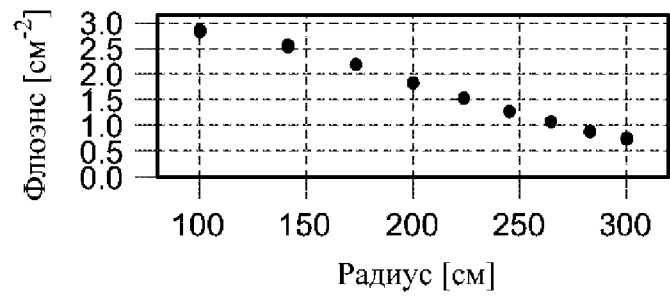
24. Установка по п.п. 22 или 23, в которой третья экранирующая излучение стена является стальной.

25. Установка по п.п. 22-24, в которой элемент с атомным числом от 1 до 8 выбран из группы, состоящей из: водорода, углерода, кислорода и бора.

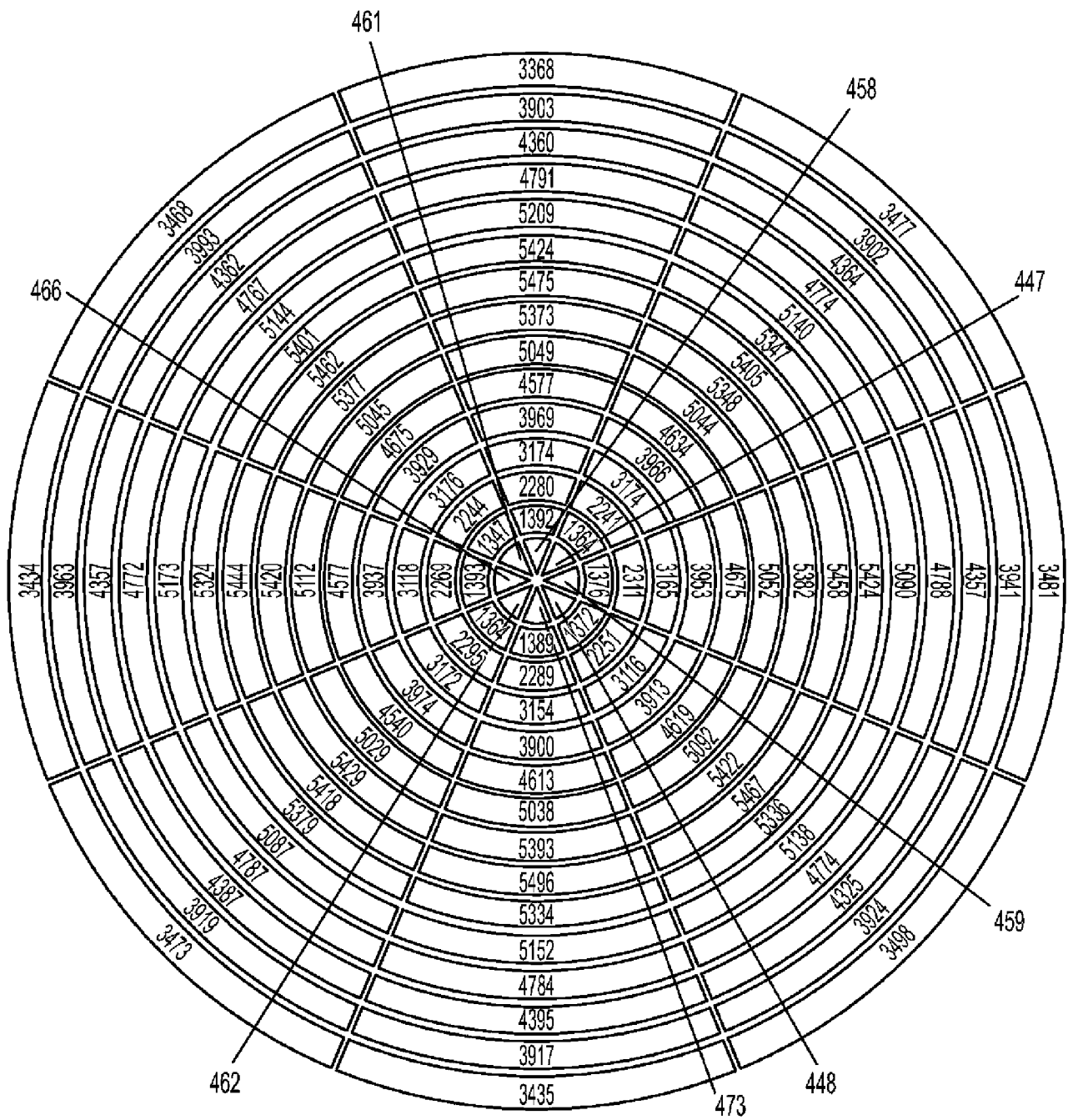
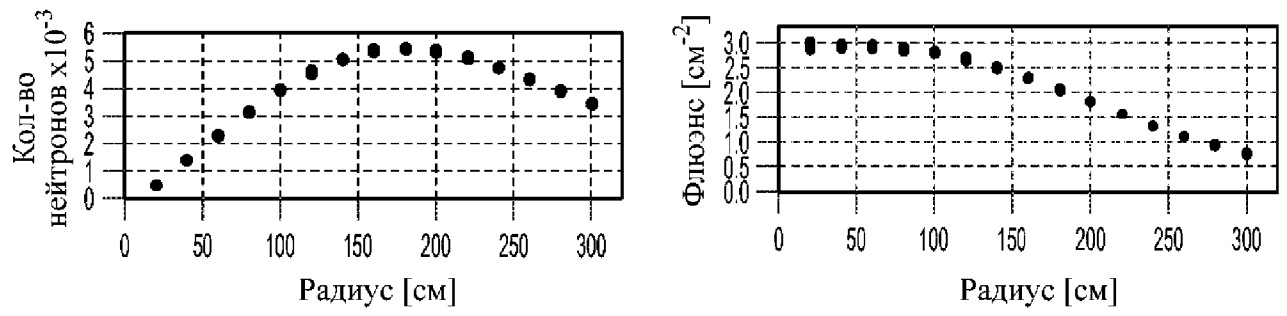
26. Установка по п.п. 22-25, в которой второй экранирующий излучение заполнитель содержит по меньшей мере одно из следующего: буру, гипс, колеманит, пластмассовый композит или известь.

27. Установка по п.п. 1-26, в которой первый экранирующий барьер является несущим.

28. Установка по п.п. 1-26, в которой первый экранирующий барьер является ненесущим.

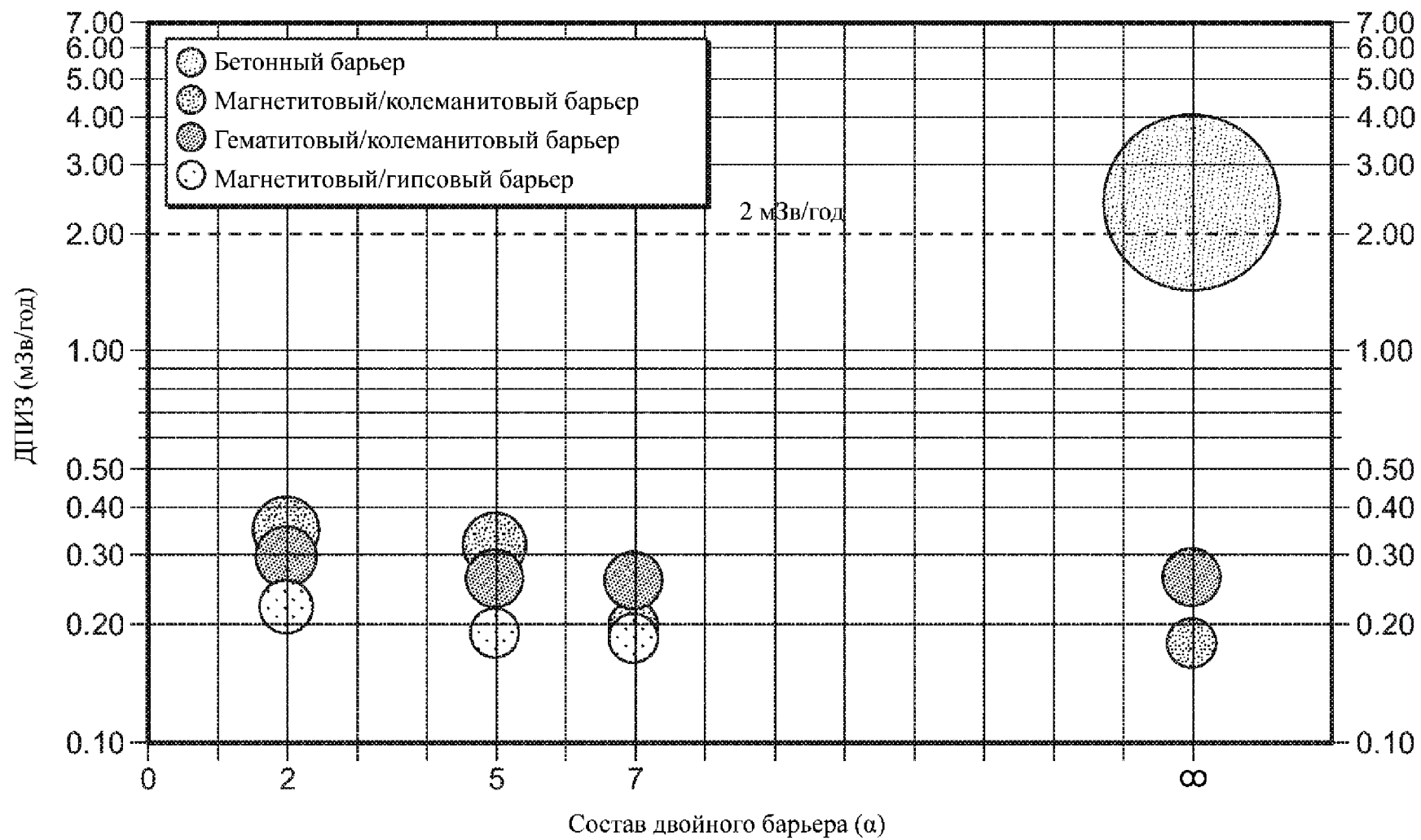


ФИГ. 1А

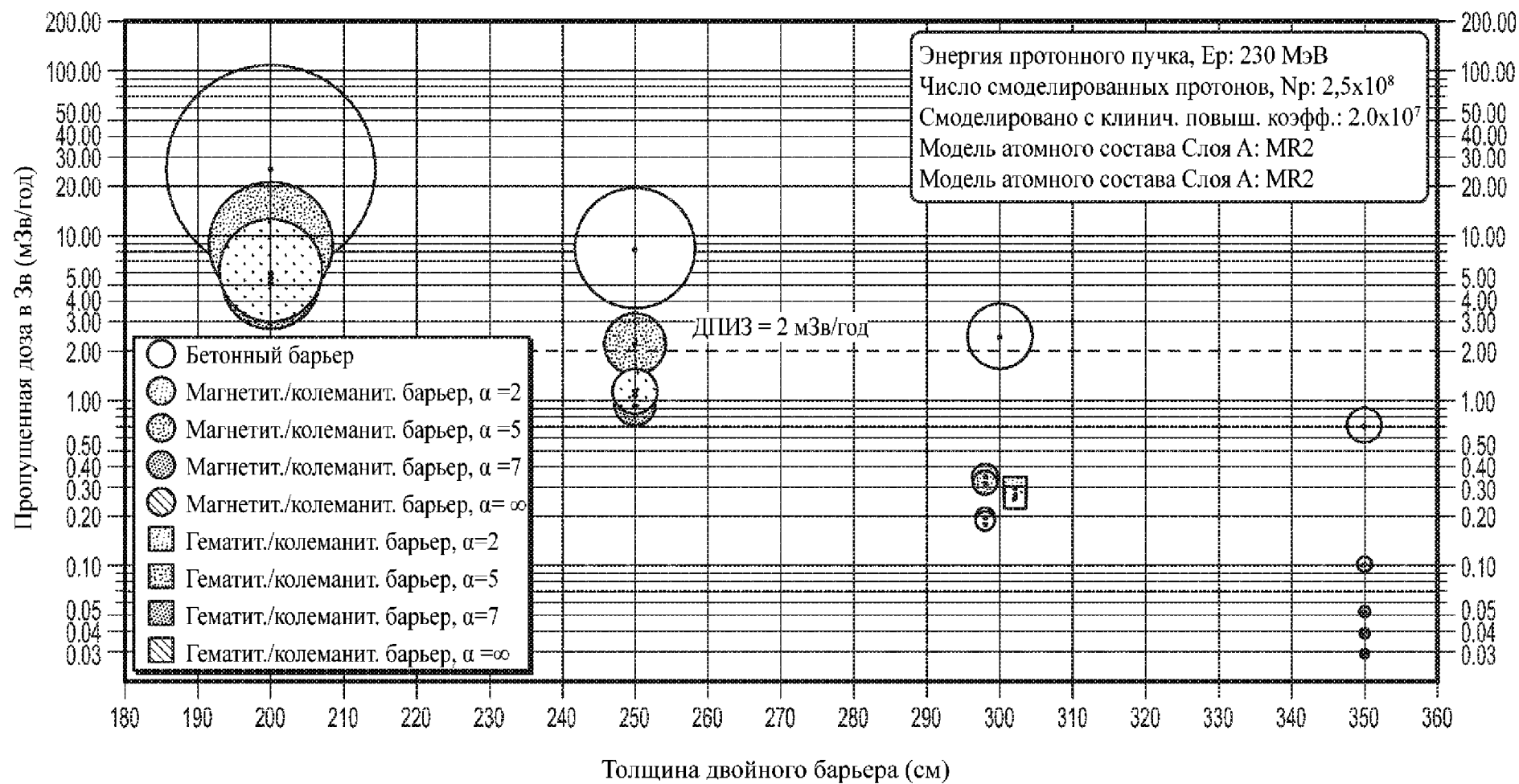


ФИГ. 1В

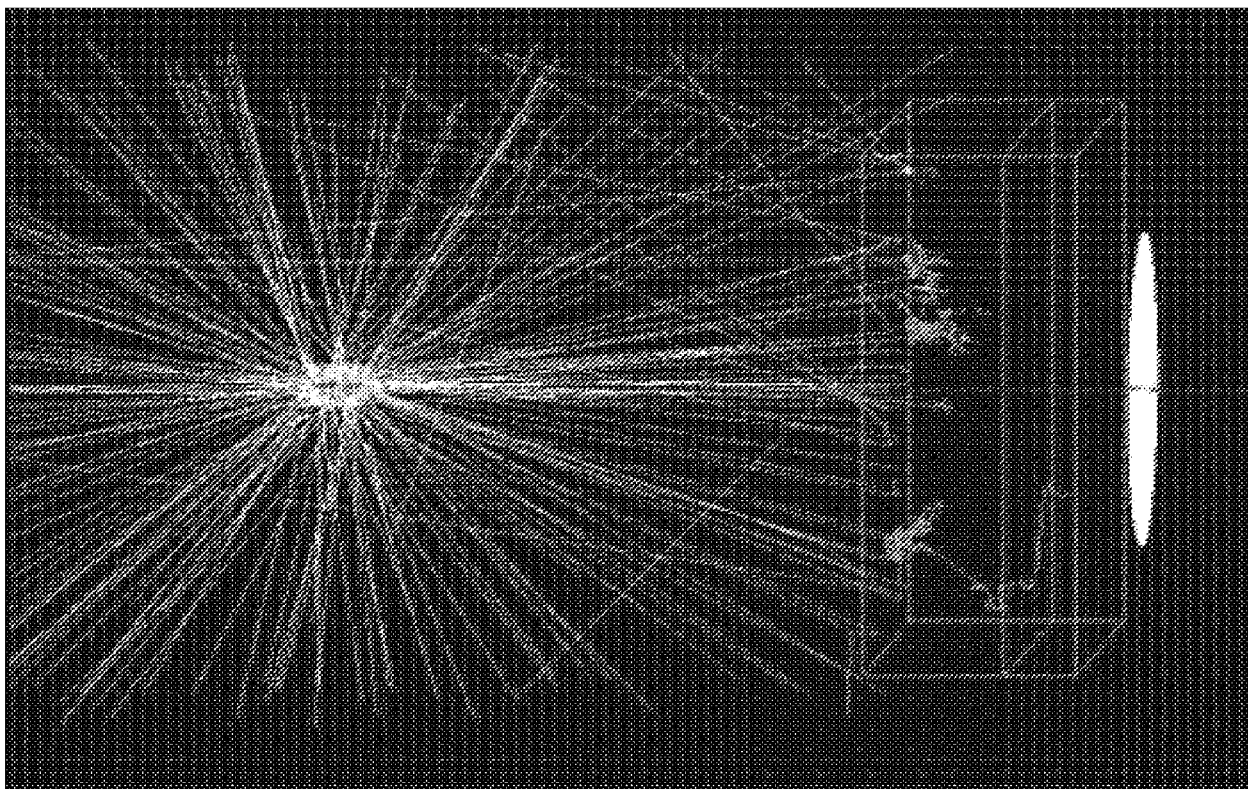
**ФИГ. 2**



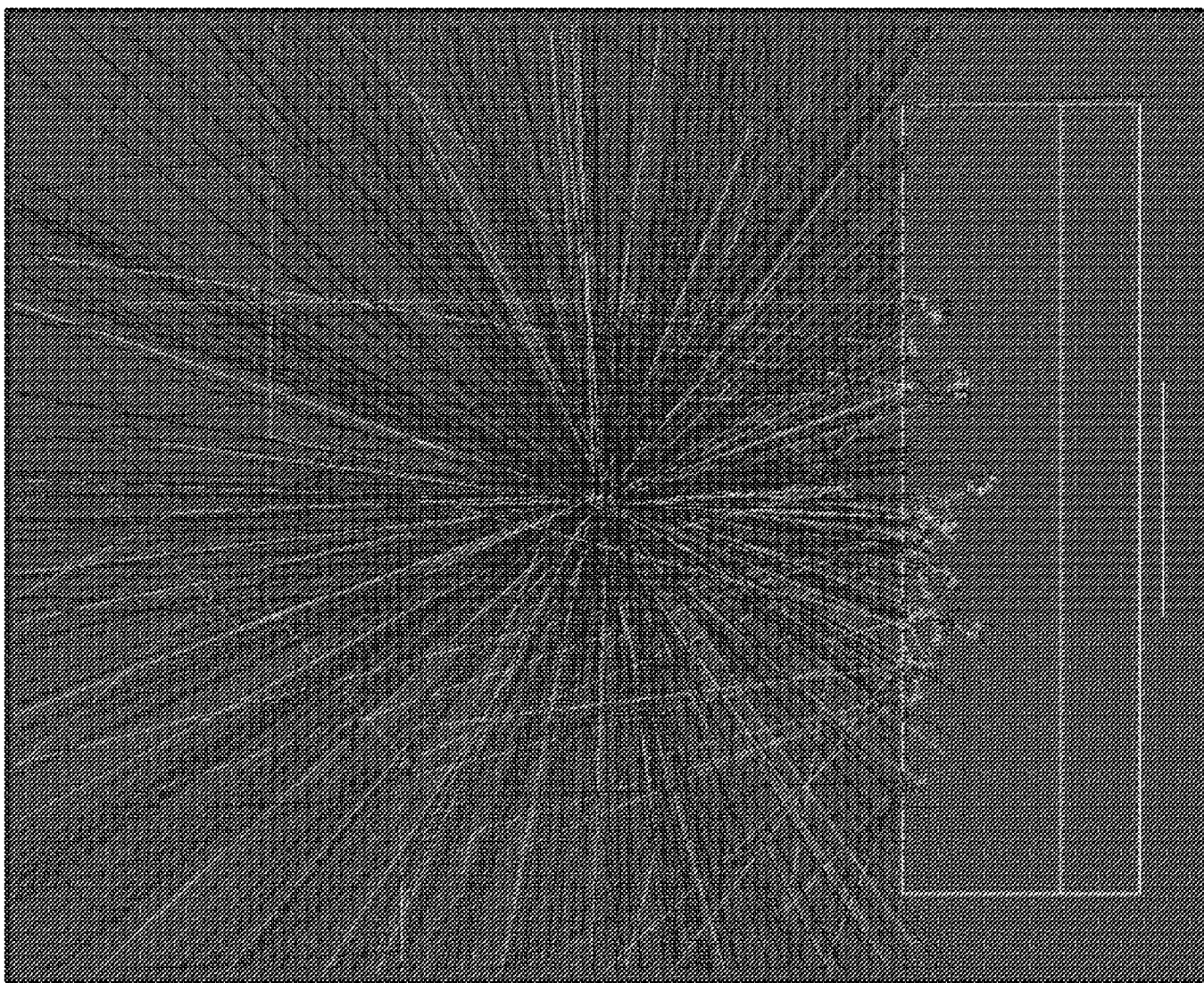
ФИГ. 3



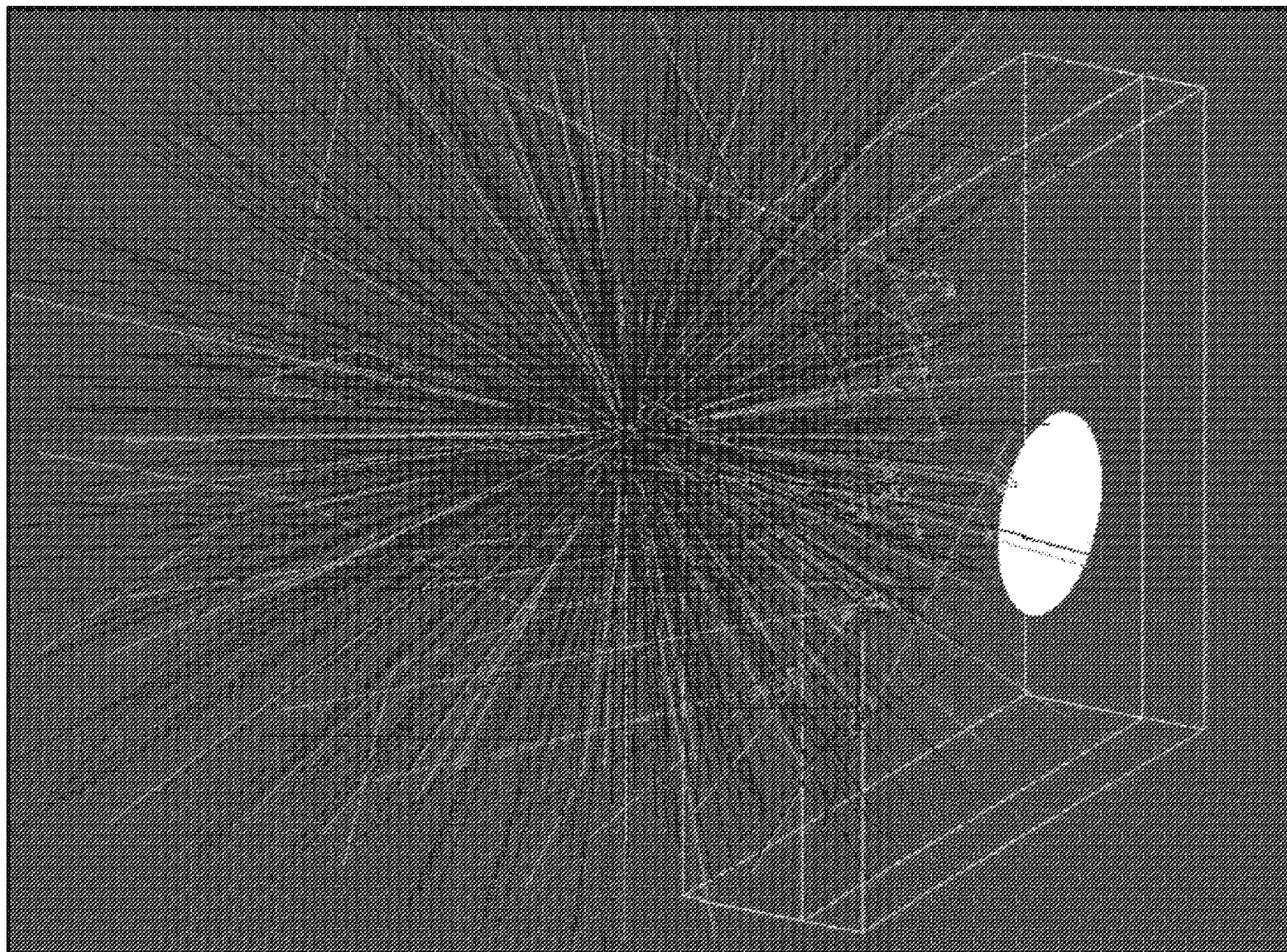
ФИГ. 4



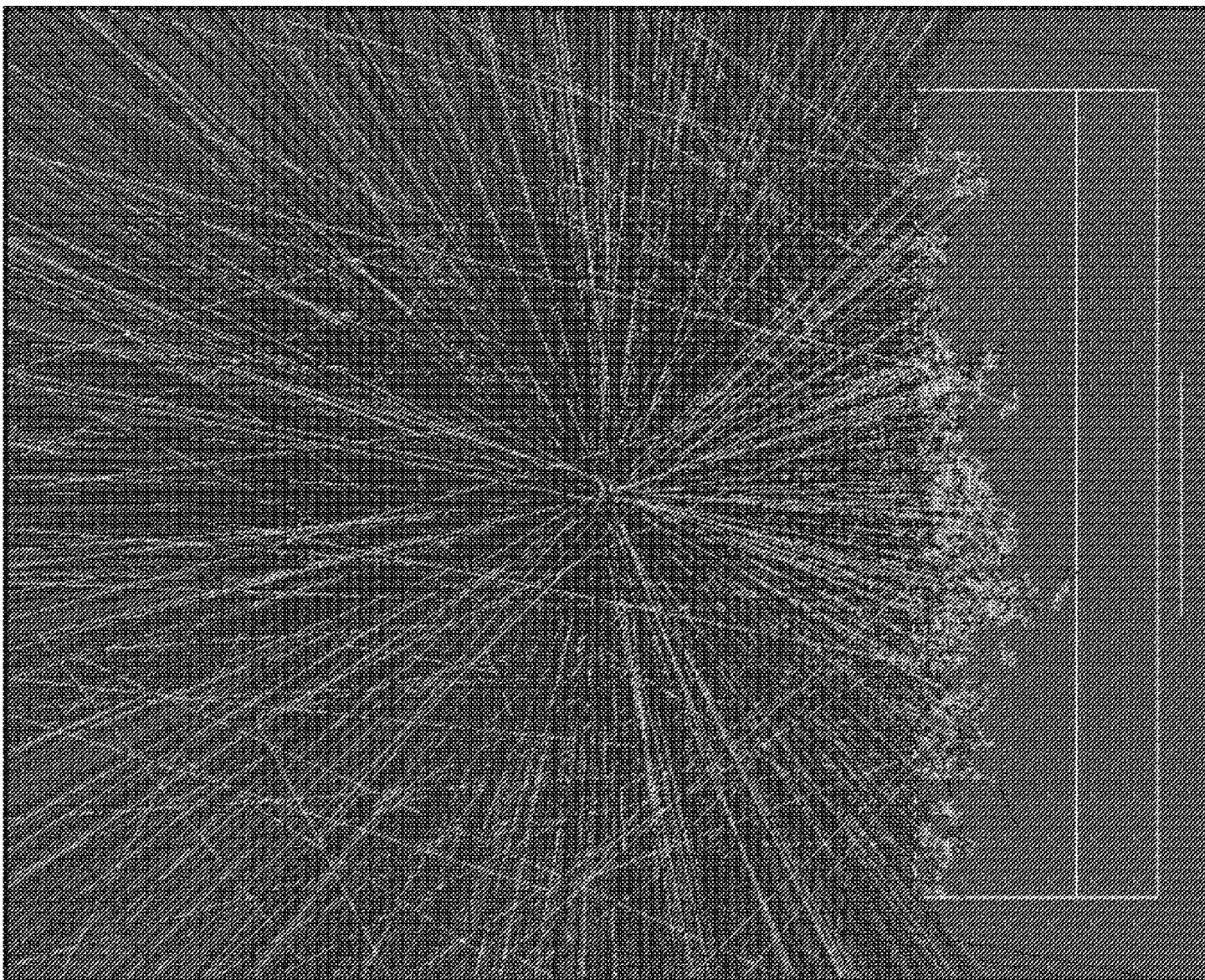
ФИГ. 5



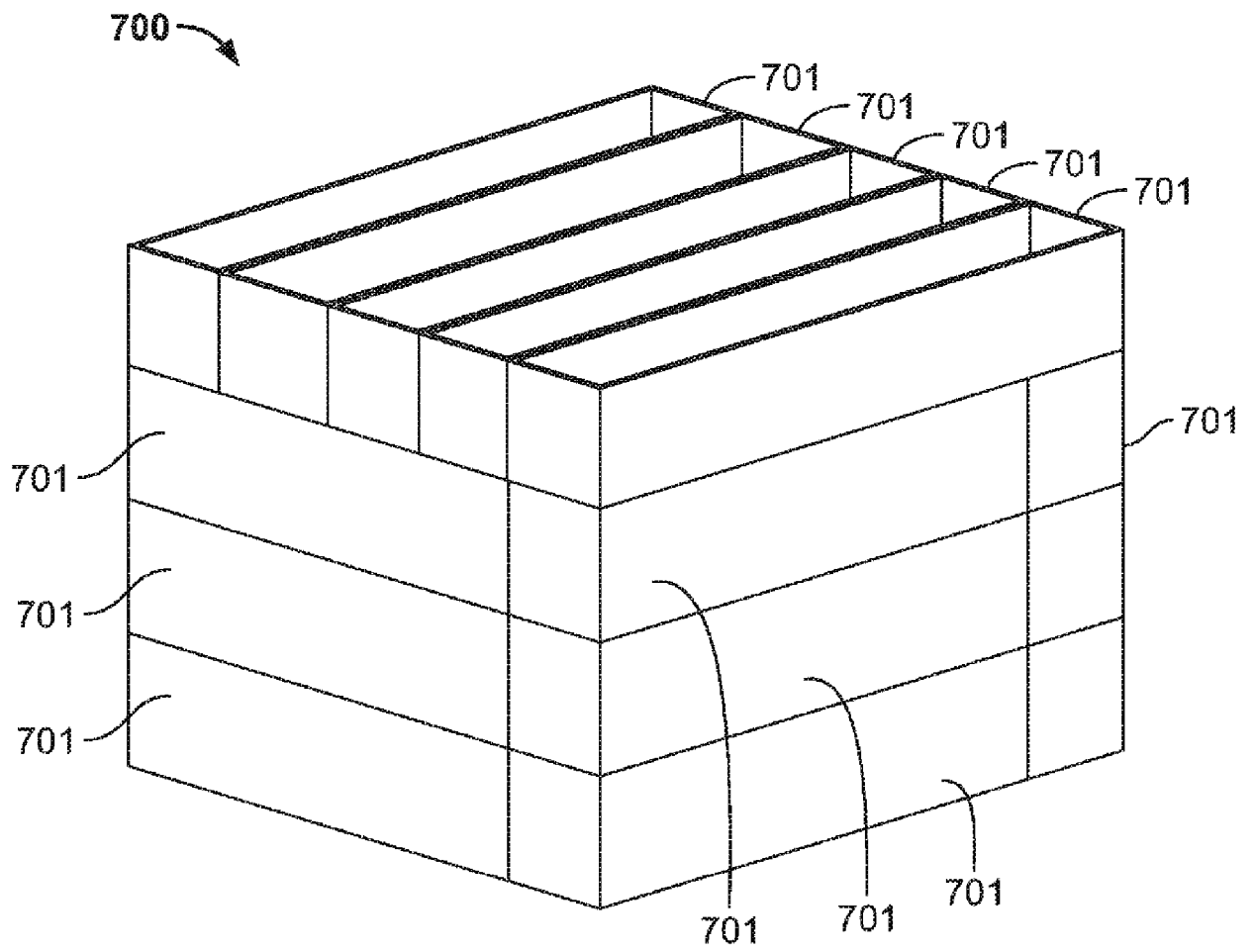
ФИГ. 6А



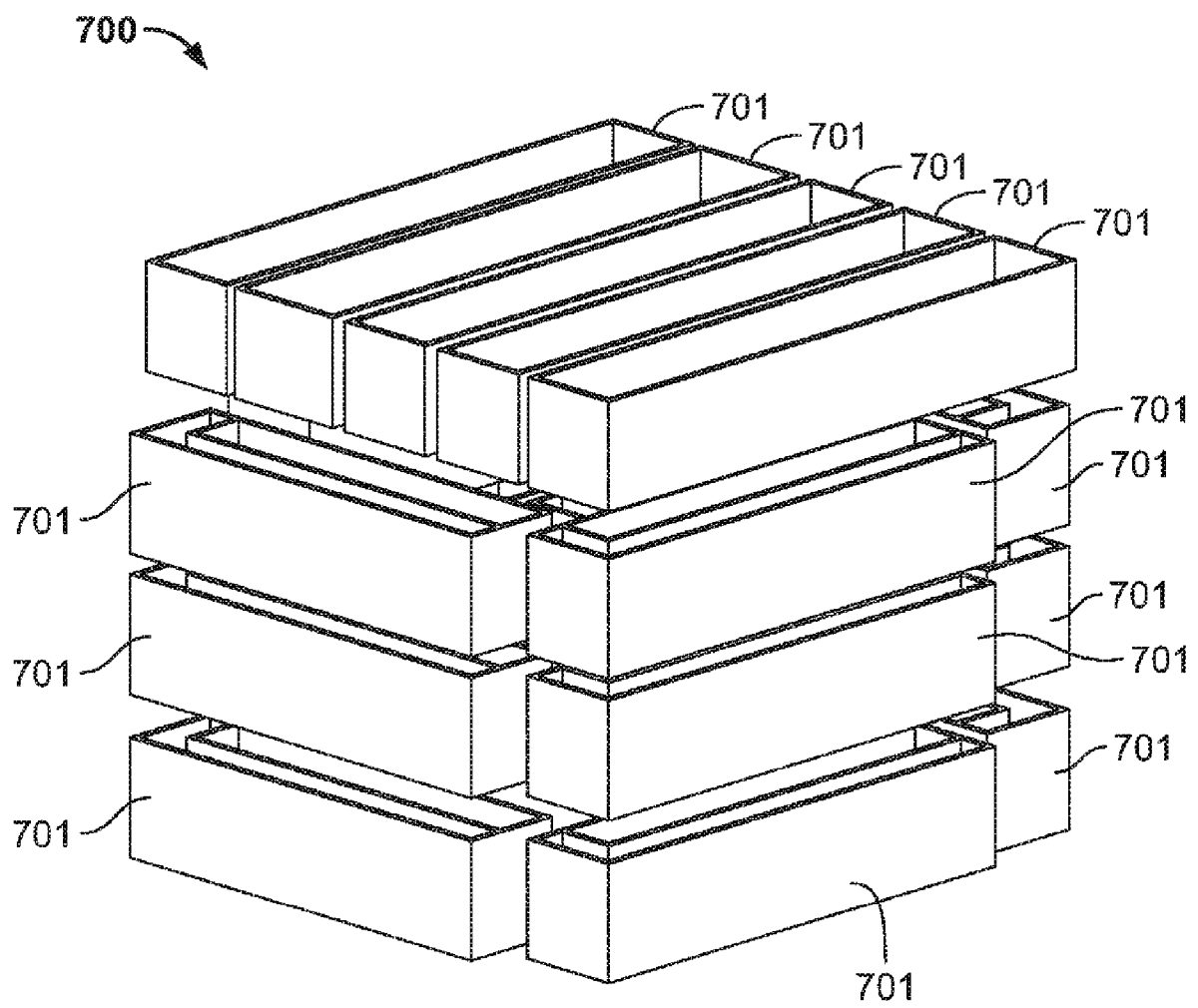
ФИГ. 6В



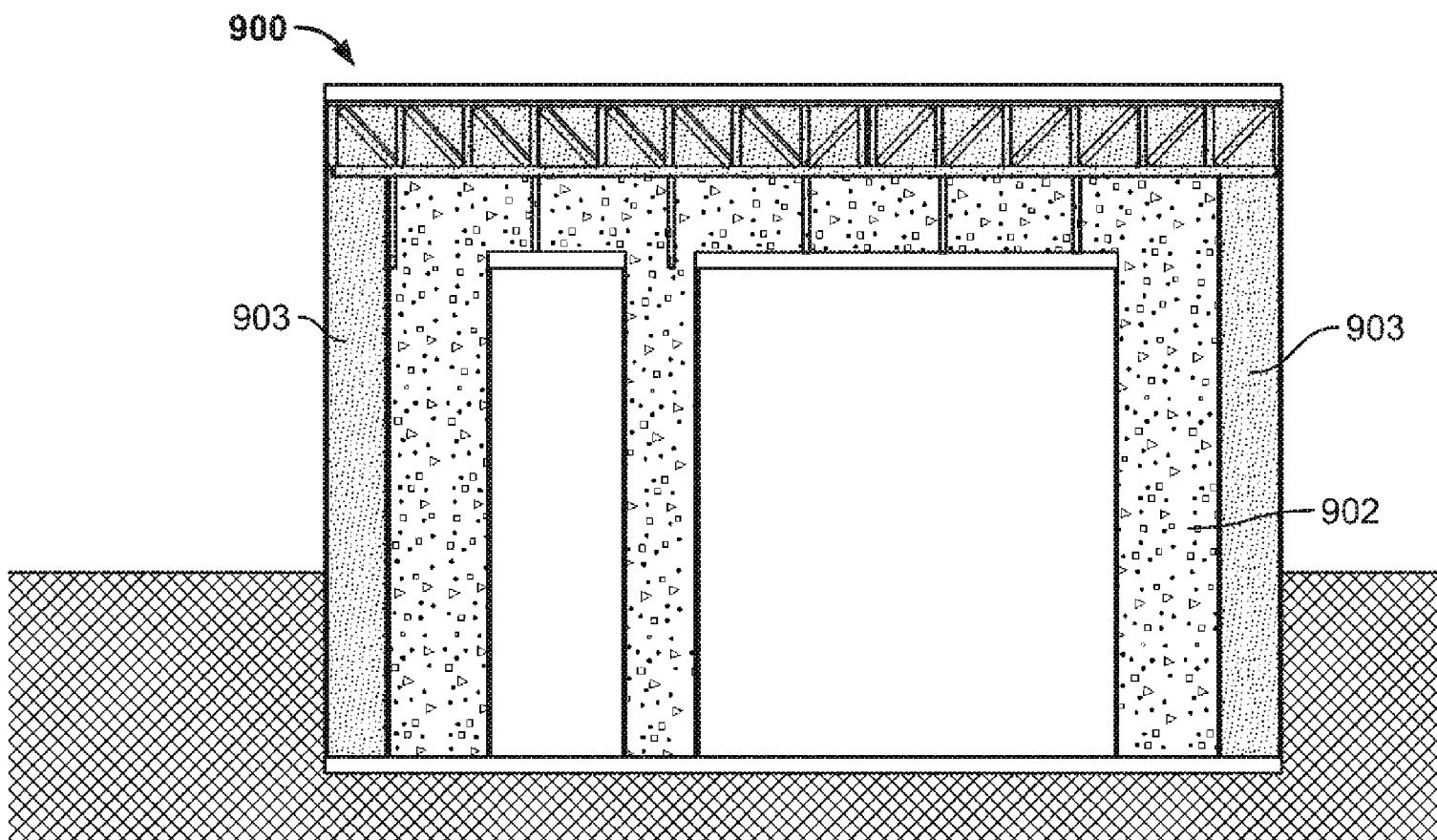
ФИГ. 6С



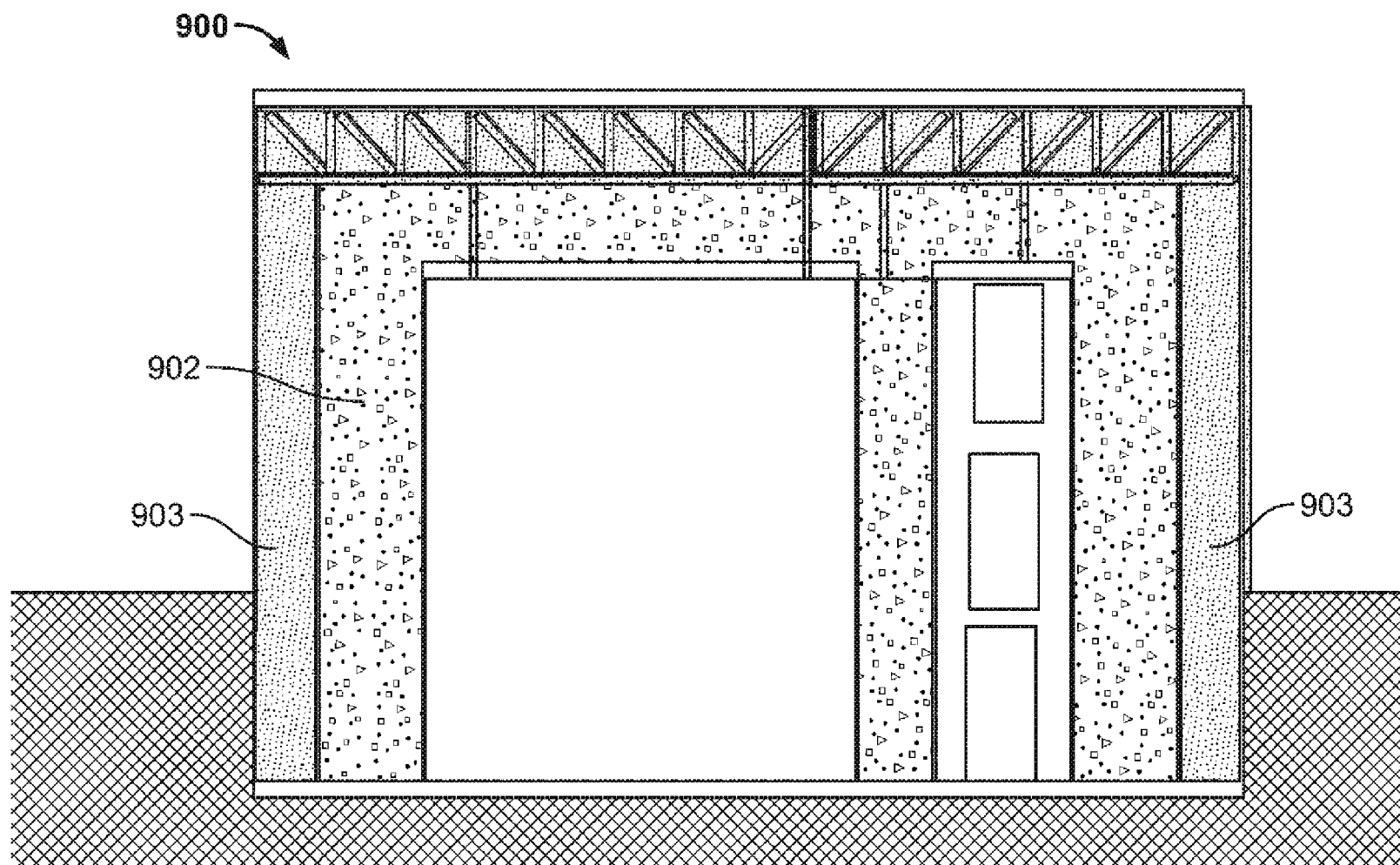
ФИГ. 7



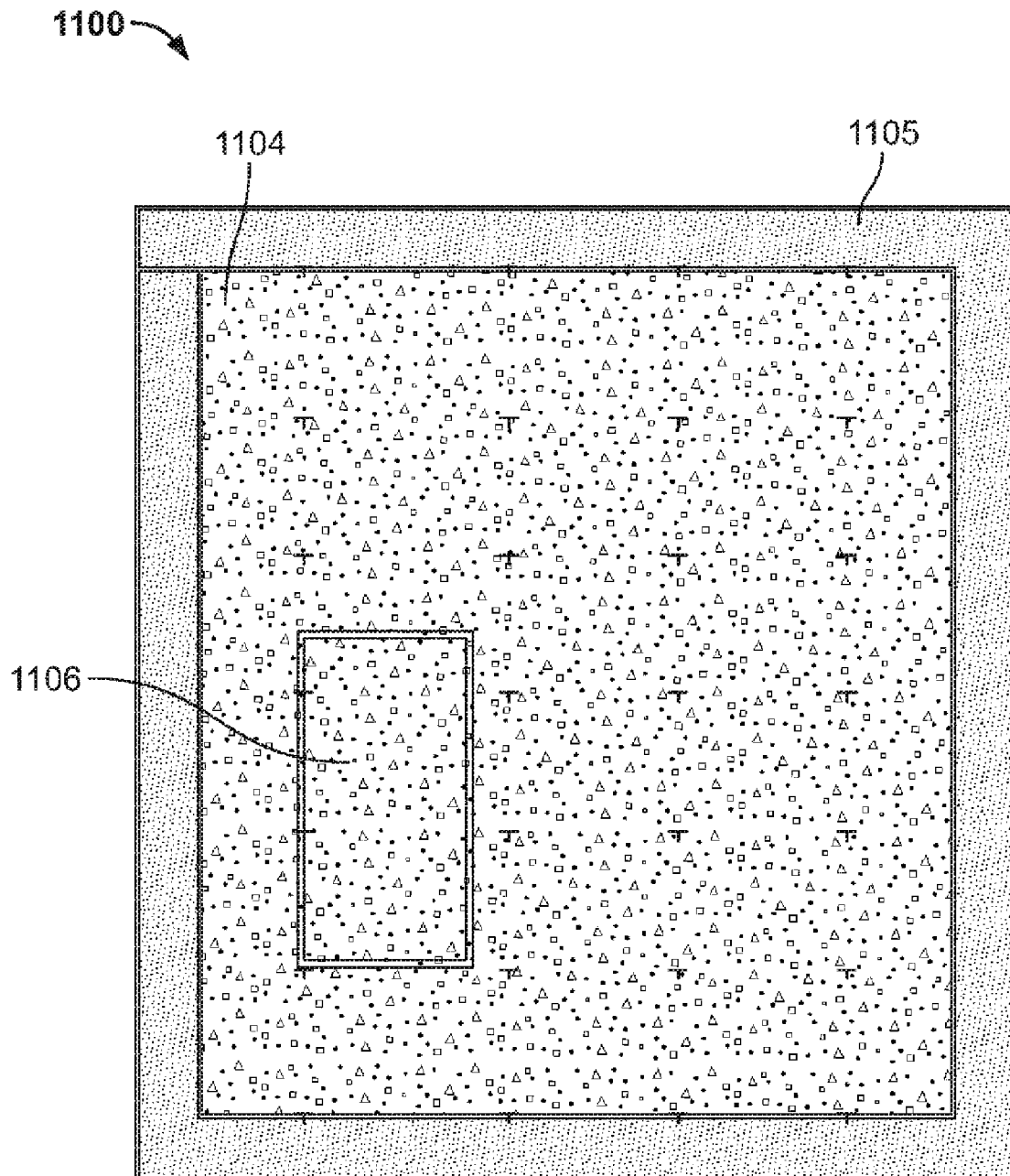
ФИГ. 8



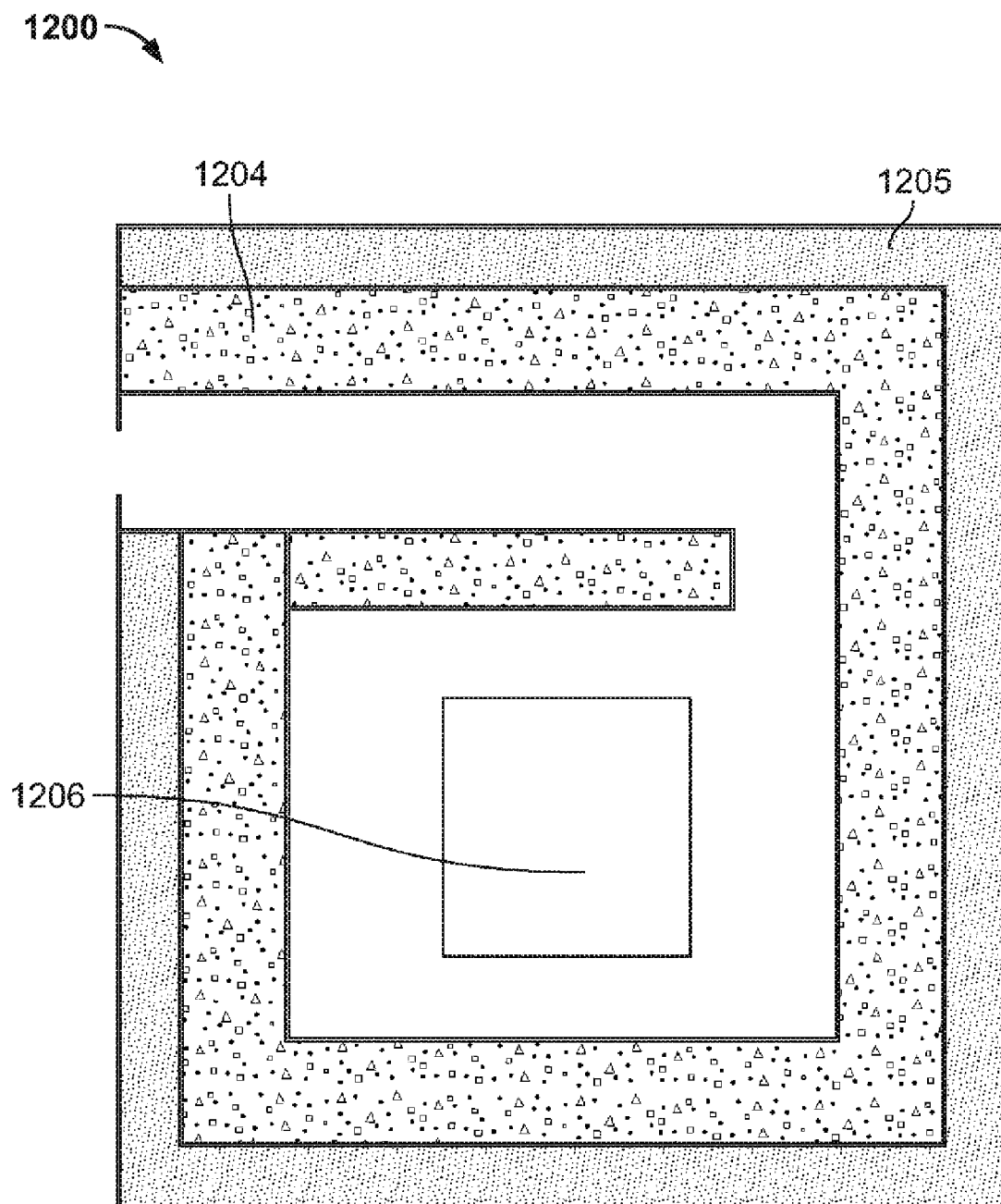
ФИГ. 9



ФИГ. 10



ФИГ. 11



ФИГ. 12

Факторы оптимизации решений по экранированию

Характеристики	Физическое пространство	Стоимость
• Фотоны • Нейтроны • Протоны • Тепловое экранирование	• Оптимизировать внутреннее пространство для данной ограниченной занимаемой площади • Высотные ограничения по вертикали • Ограничения по занимаемой площади • Ограничения по объему	• Начальное строительство • Потери от неиспользования возможности (скорость выхода на рынок) • Стоимость жизненного цикла, включая стратегию свертывания деятельности

ФИГ. 13



ФИГ. 14