



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2003129858/06, 07.10.2003

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.10.2003

(43) Дата публикации заявки: 27.03.2005

(45) Опубликовано: 27.08.2006 Бюл. № 24

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: US 3993910 A, 23.11.1976. US 4666651  
A, 19.05.1987. US 4582673 A, 15.04.1986. US  
5976066 A, 02.11.1999. RU 2052849 C1,  
20.01.1996. SU 545227 A, 23.10.1987.

Адрес для переписки:

456770, Челябинская обл., г. Снежинск, ул.  
Васильева, 13, а/я 245, отдел  
интеллектуальной собственности, Г.В.  
Бакалову, (Г.Г. Смирнову)

(72) Автор(ы):

Смирнов Геннадий Григорьевич (RU),  
Таскаев Сергей Юрьевич (RU),  
Сильвестров Григорий Иванович (RU),  
Кононов Виктор Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

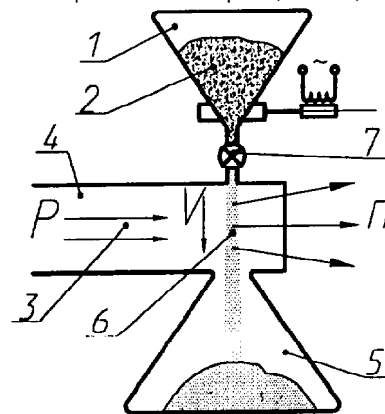
РОССИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ  
ЦЕНТР - ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ АКАДЕМИКА  
Е.И. ЗАБАБАХИНА (РФЯЦ - ВНИИТФ) (RU),  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО РАН ИМ. Г.И.  
БУДКЕРА (ИЯФ СО РАН) (RU),  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ -  
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.  
АКАД. А.И. ЛЕЙПУНСКОГО (ГНЦ РФ - ФЭИ) (RU)

## (54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНОВ

(57) Реферат:

Изобретение предназначено преимущественно для использования в нейтронозахватной терапии. Способ заключается в том, что ускоренными заряженными частицами, например протонами, облучают перемещаемый перпендикулярно указанному пучку поток разреженных частиц твердого активного материала для осуществления на указанных частицах нейтронопродуцирующей реакции. Перемещение частиц активного материала можно осуществлять с использованием гравитационных сил или с использованием перепада давлений между объемами подачи и приема частиц активного материала, формируя взвесь частиц в разреженном легком газе. Размеры, объемную концентрацию и толщину потока активных частиц выбирают из условия оптимизации ядерной реакции. Выделяемая тепловая энергия равномерно распределяется по объему потока активных частиц в рабочей зоне, что упрощает охлаждение мишени. Построение

нейтронопродуцирующих узлов на основе предлагаемого способа позволит сделать более простым и дешевым получение нейтронов для медицинских целей. 16 з.п. ф-лы, 10 ил., 1 табл.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.  
**G21G 4/02** (2006.01)  
**H05H 6/00** (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2003129858/06, 07.10.2003**

(24) Effective date for property rights: **07.10.2003**

(43) Application published: **27.03.2005**

(45) Date of publication: **27.08.2006 Bull. 24**

Mail address:  
**456770, Cheljabinskaja obl., g. Snezhinsk,  
ul. Vasil'eva, 13, a/ja 245, otdel  
intellektual'noj sobstvennosti, G.V.  
Bakalovu, (G.G. Smirnovu)**

(72) Inventor(s):

**Smirnov Gennadij Grigor'evich (RU),  
Taskaev Sergej Jur'evich (RU),  
Sil'vestrov Grigorij Ivanovich (RU),  
Kononov Viktor Nikolaevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**ROSSIJSKIJ FEDERAL'NYJ JaDERNYJ TsENTR -  
VSEROSSIJSKIJ NAUCHNO-ISSLEDOVATEL'SKIJ  
INSTITUT TEKHNIČESKOJ FIZIKI IMENI  
AKADEMIKA E.I. ZABABAKHINA (RFJaTs - VNIITF)  
(RU),  
INSTITUT JaDERNOJ FIZIKI SO RAN IM. G.I.  
BUDKERA (IJaF SO RAN) (RU),  
GOSUDARSTVENNYJ NAUCHNYJ TsENTR RF -  
FIZIKO-EhNERGETIČESKIJ INSTITUT IM. AKAD.  
A.I. LEJPUNSKOGO (GNTs RF - FEhI) (RU)**

RU 2 282 909 C2

(54) **NEUTRON PRODUCTION METHOD**

(57) Abstract:

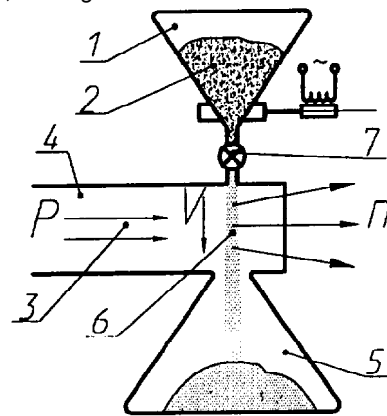
FIELD: neutron entrapping therapy.

SUBSTANCE: proposed method includes irradiation of stream of solid active-material rarefied particles moved perpendicular to mentioned beam by accelerated charged particles, such as protons, to conduct neutron-producing reaction in mentioned particles. Active material particles can be moved using gravitational forces or pressure difference between volumes of active-material particles being fed and received to form particle suspension in rarefied light gas. Size, volume concentration, and thickness of active particle stream are chosen so as to optimize nuclear reaction conditions. Heat energy released in the process is uniformly distributed throughout entire volume of active particle stream in working zone thereby simplifying target cooling. Neutron-producing assemblies implementing this method are described in

invention specification.

EFFECT: facilitated procedure, reduced cost of neutron production for medicine.

17 cl, 10 dwg



RU 2 282 909 C2

Область техники

Изобретение относится к ядерной физике и медицине и может быть применено в источниках нейтронов, выполненных на основе ускорителей заряженных частиц. Такие источники преимущественно предназначены для использования в медицинской технике, используемой для нейтронной терапии, в основном в нейтронозахватной терапии (НЗТ).

Предшествующий уровень техники

Концепция нейтронозахватной терапии в онкологии была предложена в 1936 году, спустя 4 года после открытия нейтрона. Ее физический принцип заключается в следующем. Раствор, содержащий стабильный изотоп бор-10, вводится в кровь человека и через некоторое время бор сорбируется в клетках. Затем опухоль облучается потоком эпитепловых нейтронов. В результате поглощения нейтрона стабильным изотопом  $^{10}\text{B}$  происходит ядерная реакция, и образующиеся энергетические  $\alpha$  частица и ион  $^7\text{Li}$  быстро тормозятся на длине размера клетки опухоли, выделяя энергию  $\sim 2,3$  МэВ в пределах именно той клетки, которая содержала ядро бора, что приводит к ее поражению. Таким образом, если обеспечить более высокую концентрацию  $^{10}\text{B}$  в раковой клетке по сравнению со здоровой, то борнейтронозахватная терапия (БЗНТ) позволит осуществить избирательное поражение клеток злокачественных опухолей.

За прошедший с тех пор период времени концепция НЗТ и, в частности, БЗНТ испытывала падения и взлеты. Однако в конце 60-х годов интерес к НЗТ значительно вырос. В этом большую роль сыграли исследования японского ученого Хатанаки и прогресс в синтезировании содержащих изотоп  $^{10}\text{B}$  фармпрепаратов. Получены препараты, которые создают концентрацию изотопа  $^{10}\text{B}$  в опухолевой ткани до 40 мкг/г, что в 3,5 раза больше, чем в здоровой ткани. Такая концентрация позволяет обеспечить возможность избирательного поражения раковой опухоли, что невозможно было осуществить в ранних исследованиях из-за отсутствия подобных фармпрепаратов. Для получения пучка нейтронов использовались специальные медицинские реакторы, построенные для этой цели в Брукхевене и Массачусетсе (США).

На сегодняшний день интерес к БЗНТ проявляют во многих странах мира. Одновременно ведутся работы, направленные на получение нейтронов нужных для БЗНТ энергий без использования реакторных установок.

Предложены различные принципы построения систем БЗНТ на базе ускорителя с пучком частиц, взаимодействующим с мишенью для генерации нейтронов.

Многообещающим достижением является концепция протонный пучок - литиевая мишень, согласно которой пучок низкоэнергетических протонов (с энергией порядка 2 МэВ) ударяет в литиевую мишень, генерируя нейтроны путем (p, n) реакции.

Привлекательными чертами концепции являются:

- относительно высокий выход нейтронов (около  $10^{-4}$ ),
- возможность обеспечения низкой максимальной энергии генерируемых нейтронов (не более 30 кэВ),
- относительно простой низкоэнергетический протонный ускоритель,
- возможность работы в "открытой" геометрии, когда расстояние от мишени до пациента минимально (10-20 см),
- минимально необходимое экранирование и приемлемая остаточная радиоактивность.

В России проработана концепция протонный пучок - литиевая мишень, включающая использование тандемного ускорителя протонов для воздействия на литиевую мишень с энергией, превышающей порог продуцирования 1,88 МэВ при реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ , подобная описанной в патенте США №5976066, опубл. 02.11.99, Yanch J.C. и др., патентообладатель Massachusetts Institute of Technology, Newton Scientific, Inc.

Предварительные исследования показали, что данное предложение является вполне приемлемым, при этом требуемый ток протонного пучка должен составлять 10 мА и более для обеспечения необходимой дозы в зоне лечения.

Тем не менее, концепция литиевой мишени на базе ускорителя все еще имеет нерешенные критические проблемы, включающие требования больших протонных токов,

излишки энергетических нейтронов и охлаждение мишени из лития, имеющего низкую температуру плавления. Как альтернатива, в качестве мишенного материала рассмотрен бериллий, который имеет более высокую температуру плавления по сравнению с литием, легче охлаждается и успешно используется в клиническом оборудовании при терапии  
 5 быстрыми нейтронами. Например, для реакции  ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{Be}$  при  $E=2,5$  МэВ и  $I=10$  мА выход нейтронов  $S\sim 4\cdot 10^{13}$  н/с, что в 4 раза больше, чем для другой реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  для тех же условий. Однако при этом в спектре наблюдаются высокоэнергетические нейтроны с энергией 100-800 кэВ, и для превращения их в эпитепловые нейтроны с энергией 1-30 кэВ, которые нужны для НЗТ, используют замедлители на основе оксида  
 10 бериллия, оксида алюминия и тяжелой воды. При этом требуются расстояния от мишени до пациента не менее 50 см, что снижает на порядок плотность потока эпитепловых нейтронов в опухоли.

Использование реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  в ближней надкритической области энергии протонов, когда разность между порогом реакции  $E_{кр.}=1,88$  МэВ и падающей на мишень  
 15 энергией составляет 0-30 кэВ, позволяет:

- приблизить пациента к мишени на расстояние 10-20 см, т.е. работать в "открытой геометрии",

- использовать, так называемую "кинематическую коллимацию", когда эпитепловые нейтроны распространяются прямо в пределах пространственного угла 20-30°.

В экспериментах последняя реакция изучена при токах 1-2 мА. Это соответствует мощности пучка 2-4 кВт. Современный уровень развития НЗТ с учетом достижений  
 20 медицины, технологий и фармпрепаратов требует увеличения мощности примерно на порядок.

Известные способы получения нейтронов для использования в НЗТ можно разделить на  
 25 два вида. Первый способ заключается в облучении пучком заряженных частиц с выхода ускорителя неподвижной мишени с активным материалом. Второй способ предполагает облучение аналогичным пучком подвижной мишени, содержащей активный материал, на котором происходит нейтронопродуцирующая реакция.

Первый из указанных способов реализован, например, в устройствах, защищенных  
 30 патентами США №4666651, опубл. 19.05.1987 г., Barjon Robert, патентообладатель: Commissariat a l'Energie Atomique (Paris, Fr), Centre Antoine-Lacassagne (Nice, Fr.) и №5920601, опубл. 06.07.1999 г., Nigg David W. и др., патентообладатель: Lockheed Martin Idaho Technologies Company (Idaho Falls, ID). Недостаток способа в  
 35 необходимости использования интенсивного охлаждения активного материала статической мишени. Второй способ реализован в устройствах, защищенных патентом США №4582673, опубл. 15.04.1986 г., Gunter Bauer, патентообладатель: Kernforschungsanlage Juljich Gesellschaft, Fed. Rep. of Germany. При подвижной мишени снижаются требования к системе охлаждения, но требуются специальные устройства для приведения мишени в  
 40 движение.

Статическая и подвижная мишени нейтронопродуцирующего узла выполняются из твердого или жидкого активного материала.

В качестве прототипа выбран способ получения нейтронов, основанный на ядерной  
 45 реакции в активном материале динамической мишени, облучаемой потоком ускоренных заряженных частиц. В качестве динамической мишени в данном решении используется поток жидкого лития, перетекающий под действием силы тяжести из одной емкости в  
 другую, образуя тонкий пристенный слой, в котором и происходит ядерная реакция (патент США №3993910, опубл. 23.11.1976, Don M.Parkin, Norman D.Dudey, патентообладатель United States Energy Research & Development Administration).

При использовании данного способа относительно просто решается вопрос с  
 50 охлаждением системы, но возникают трудноразрешимые проблемы, связанные с очисткой системы и лития от радиоактивного загрязнения. Это происходит, в том числе, от интенсивного испарения активного материала - лития в объем ускорителя.

Раскрытие изобретения

Настоящее изобретение направлено на создание способа, позволяющего устранить или существенно уменьшить указанные недостатки.

Поставленная задача решается тем, что в способе получения нейтронов, основанном на ядерной реакции в активном материале динамической мишени, облучаемой потоком ускоренных заряженных частиц, согласно изобретению в качестве мишени используют перемещаемый перпендикулярно пучку заряженных частиц поток разреженных твердых частиц активного материала.

Таким образом, предлагается использовать иное агрегатное состояние активного материала - взвесь, которая в отличие от тонкого покрытия активным материалом в жидком или твердом состоянии занимает в  $10^2$ - $10^4$  раз больший объем и обеспечивает нейтронопродуцирующую реакцию при взаимодействии заряженных частиц с разреженными частицами активного материала. Тепловая энергия при этом выделяется на существенно большей поверхности, чем это имеет место в известных мишенях и достаточно равномерно распределяется по всему объему, практически не нагревая другие элементы устройства, взаимодействующие с активным материалом. Кроме того, данный способ позволяет использовать активный материал с более высокой температурой плавления по сравнению с чистым литием, что существенно снижает испарение активного материала и загрязнение радиоактивными парами элементов системы.

Перемещение частиц может происходить под воздействием гравитационных сил. Такое перемещение можно организовать, разместив объем, подающий частицы активного материала в рабочую зону, над приемным объемом.

В другом варианте перемещение частиц активного материала может быть осуществлено в потоке легкого разреженного газа под действием перепада давлений между объемами подачи и приема частиц активного материала. В этом случае величину давления в объеме подачи частиц активного материала целесообразно выбирать в диапазоне 10-100 мм рт.ст., а в объеме приема - менее 1 мм рт.ст.

На активный материал, находящийся в объеме подачи частиц активного материала, можно воздействовать вибрацией, что обеспечит более равномерное перемещение и однородность взвеси.

При использовании перепада давлений можно осуществлять перемешивание частиц активного материала в объеме подачи частиц активного материала, что также обеспечит получение однородной взвеси.

Для обеспечения заданной объемной концентрации и скорости перемещения частиц активного материала в рабочей зоне на ее входе осуществляют регулируемое дросселирование и формирование сечения потока частиц активного материала. Изменением размеров впускного отверстия, соединяющего подающую емкость с каналом рабочей зоны, обеспечивают поступление в канал заданного количества частиц активного материала за единицу времени.

Размер частиц активного материала, толщину слоя частиц и их концентрацию следует выбирать из условия обеспечения полного пробега  $\delta$  заряженных частиц в таком слое. Другими словами, толщина слоя частиц не должна быть меньше, чем длина пробега заряженных частиц в активном материале мишени.

В качестве активного материала может быть использован один из твердых литийсодержащих материалов, а в качестве заряженных частиц - протоны.

При этом концентрация активных частиц в рабочей зоне может быть выбрана равной  $10^{-2}$ - $10^{-3}$ , а средний размер частиц выбирают, как минимум, на порядок меньше величины пробега  $\delta$ . При такой концентрации продуцирование нейтронов происходит в относительно тонком верхнем слое сечения мишени. В остальной части рабочей зоны будет происходить нагрев частиц потока за счет энергии торможения заряженных частиц в активном материале.

В другом варианте толщину слоя частиц активного материала и его концентрацию выбирают из условия обеспечения пробега  $\Delta$  заряженных частиц только в надкритической реакции. При этом необходимо стенку рабочей зоны в области выхода нейтронов

охлаждать. Такое охлаждение необходимо, т.к. протоны выделяют свою энергию на всем пробеге и наиболее заметно в области т.н. пика Брэгга.

Концентрацию частиц активного материала в этом случае целесообразно выбирать  $\sim 10^{-4}$  исходной плотности твердого материала, а средний размер частиц -

5 примерно на порядок меньше величины надкритического пробега  $\Delta$ .

В следующем варианте исполнения толщину слоя частиц следует выбирать в  $K$  раз больше, где  $K=2-10$ , но при этом по толщине потока частиц активного материала в рабочей зоне прикладывают ускоряющее напряжение  $U=(K-1) \cdot (1,91-1,88)$  МэВ. Это

10 вызвано тем, что в увеличенном слое будет происходить в  $K$  раз больше столкновений частиц с энергией выше 1,88 МэВ с частицами активного материала и, как следствие, большие потери ими энергии, которые будут компенсироваться ускорением заряженных частиц в процессе их пролета через рабочую зону.

Обеспечить герметичное разделение канала потока частиц активного материала от канала подачи заряженных ускоренных частиц можно тонкой лентой из легкого металла с

15 высокой теплоемкостью, которую перемещают перпендикулярно оси канала подачи в рабочую зону ускоренных заряженных частиц.

Охлаждение стенки рабочей зоны в области выхода нейтронов можно осуществлять разными путями. Наиболее традиционный способ заключается в охлаждении потоком жидкой или газовой среды. В другом варианте охлаждение можно осуществлять путем

20 перемещения относительно указанной стенки ленты, выполненной из материала с высокой теплопроводностью, при этом перемещение производят перпендикулярно оси канала подачи ускоренных заряженных частиц. С помощью такой ленты производят утилизацию выделяемого тепла.

Скорость потока частиц активного материала в рабочей зоне целесообразно выбирать в

25 диапазоне 0,2-2,0 м/с.

Краткое описание чертежей

Заявляемый способ иллюстрируется фигурами 1-10.

На фиг.1 приведена схема мишенного узла, реализующего способ с использованием

30 гравитационной силы, на которой показаны:

- 1 - объем подачи активного материала;
- 2 - тонкодисперсный активный материал (порошок LiH, Li<sub>2</sub>O, LiF и т.п.);
- 3 - пучок заряженных частиц от ускорителя, например, протонов P;
- 4 - канал поступления заряженных частиц в рабочую зону;
- 5 - приемный объем;
- 35 6 - поток разреженных частиц активного материала;
- 7 - кран-дроссель;
- 8 - узел вибрации объема подачи;
- v - скорость перемещения частиц взвеси;
- n - продуцируемые нейтроны.

40 На фиг.2 приведена схема мишенного узла, реализующего способ получения нейтронов с использованием истечения взвеси частиц в легком газе, где дополнительно к вышеприведенным позициям показаны:

- 9 - объем формирования взвеси;
- 10 - устройство формирования взвеси.

45 На фиг.3 приведена схема, иллюстрирующая эффект увеличения активной поверхности за счет наклонной стенки, где:

- $S_0$  - площадь стенки, перпендикулярной потоку заряженных частиц;
- $S_1 = S_0 / \sin \alpha$  - площадь наклонной стенки.

50 На фиг.4 приведена схема, иллюстрирующая эффект наклонной стенки в объеме пылевидной взвеси, где:

- $\Delta$  - размер частиц взвеси  $11$ ;
- a - расстояние между частицами.

На фиг.5 показан условный пример пролета протона с энергией 1,91 МэВ через три

частицы активного материала в надкритической реакции.

На фиг.6 - схема полного торможения потока заряженных частиц в потоке 6 разреженных частиц активного материала, где:

$\delta$  - полный пробег протонов;

5  $m$  - число условных слоев в полном пробеге протонов  $\delta$ ;

$a \cdot m$  - размер пробега протонов в надкритической реакции.

На фиг.7 приведена схема рабочей зоны с глубиной канала перемещения взвеси, несколько большей надкритического пробега заряженных частиц, где:

12 - канал перемещения разреженной взвеси;

10 13 - канал охлаждения;

$V_{ж}$  - скорость перемещения охлаждающей жидкости.

На фиг.8 схематически показано перекрытие канала перемещения взвеси от объема канала поступления заряженных частиц тонкой лентой, перемещающейся перпендикулярно оси указанного канала, где 14 - лента из фольги легкого металла (Al, Be),

15 перематываемая с барабана на барабан.

На фиг.9 показана схема канала перемещения взвеси с нагревом дополнительной ленты, аккумулирующей остаточную тепловую энергию потока заряженных частиц, где 15 - лента из материала с большой теплоемкостью, перематываемая с барабана на барабан.

20 На фиг.10 показана схема канала для перемещения потока взвеси, глубина которого равна нескольким надкритическим пробегам  $K \cdot a \cdot m$ , а по глубине прикладывается ускоряющее напряжение, равное  $(K-1) \cdot \Delta E$ , где  $\Delta E$  - надкритическая потеря энергии протонов ( $\Delta E = 1,91 \text{ МэВ} - 1,88 \text{ МэВ} = 0,03 \text{ МэВ}$ ).

Варианты осуществления изобретения

25 Способ реализуется следующим образом.

В объеме 1 (фиг.1) или 6 (фиг.2) подачи активного материала размещают определенное количество активного материала в виде тонкодисперсного порошка твердого материала. Это может быть литийсодержащий материал: гидрид лития LiH, оксид лития  $\text{Li}_2\text{O}$  или фторид лития LiF. В этом случае при бомбардировке протонами происходит ядерная реакция  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$ . В другом случае в качестве активного материала может быть использован бериллий (реакция  ${}^9\text{Be}(p, n){}^{10}\text{Be}$ ). Возможно использование также других активных материалов.

Из объема 1 или 6 сыпучий активный материал в форме плоской разреженной стенки определенной толщины с заданной скоростью перемещают в приемный объем. В 35 простейшем случае такое устройство можно выполнить по аналогии с песочными часами, когда перемещение активного материала происходит под действием гравитационных сил (фиг.1). Открывают кран 7 с дросселем и формирователем сечения потока частиц, после чего подают поток  $P$  заряженных частиц. Например, для НЗТ необходим следующий режим: энергия протонов  $E_0 = 1,91 \text{ МэВ}$ , диаметр пучка - 50 мм, ток - 10 мА, длительность - 500 40 с. Для утилизации  $\sim 10$  мДж тепловой энергии, возникающей при нагреве на  $500^\circ\text{C}$ , достаточно 5-6 кг порошка гидрида лития. Расход порошка при этом составит около 10 г/с. Если задаться глубиной канала взвеси  $\delta = 5 \text{ мм}$ , то концентрация частиц активного материала по центру пятна будет равна  $10^{-2}$ , а скорость их перемещения  $\sim 0,4 \text{ м/с}$ . При среднем размере частиц, равном 1 мкм, поток частиц будет состоять из 50 слоев.

45 Для надежной и повторяемой процедуры целесообразно воздействовать на объем подачи активного материала вибрацией от простого внешнего устройства.

В другом варианте (фиг.2) активный материал предварительно располагается в среде легкого газа, например в водороде или гелии, с небольшим остаточным давлением 10-100 мм рт.ст. При этом объем 9 подачи на порядок больше объема активного материала 2 50 (если активного материала, к примеру, 5 л, то объем подачи должен быть  $>50$  л. Далее включается устройство 9 формирования взвеси в объеме, в простейшем случае - вентилятор. При этом концентрация взвеси в объеме 9 подачи составит  $10^{-1}$ . Если открыть кран 7 с дросселем и формирователем сечения, то под действием перепада

давлений (в объеме подачи  $P_1=100$  мм рт.ст., в объеме приема, который много больше объема подачи,  $P_2=1$  мм рт.ст.) в канале рабочей зоны б сформируется поток частиц, из которых протоны  $P$  начнут выбивать эпителиевые нейтроны  $n$ . Режимы и параметры в этом варианте аналогичны примеру, рассмотренному выше.

5 Использование наклонной рабочей поверхности активного материала по отношению к направлению потока заряженных частиц известно. Упрощенная схема такого решения показана на фиг.3. Если, к примеру, сечение канала поступления заряженных частиц, в нашем случае - протонопровода, составляет 50 мм, а рабочая поверхность при этом  $\sim 20$  см<sup>2</sup>, то наклон рабочей поверхности на угол  $\alpha=30^\circ$  вдвое увеличивает поверхность и, как  
10 следствие, удельная тепловая нагрузка снижается с 1 кВт/см<sup>2</sup> до 0,5 кВт/см<sup>2</sup>, а это существенно.

При использовании в качестве рабочего материала взвеси многократно увеличивается рабочая поверхность активного материала.

15 Несложно показать (см. фиг.4), что при концентрации, составляющей  $10^{-3}$  от исходной,  $a/\Delta=10$ , и поверхность активного материала также увеличивается более чем на порядок. Если выбрать размер частиц взвеси меньше величины пробега (см. фиг.5), то эту величину следует умножить на число слоев, укладываемых в пробеге (для фиг.5 это число составляет 3).

20 В наиболее простом для реализации и рассмотрения случае вся энергия пучка заряженных частиц утилизируется в потоке разреженных частиц активного материала. Сечение по потоку при этом показано на фиг.6. Протоны полностью тормозятся на глубине  $\delta$ . На приповерхностной глубине "а-м" происходит надкритическая реакция (формируются нейтроны).

25 В таблице для анализа реакции  ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$  представлены характеристики некоторых активных литийсодержащих материалов.

Характеристики	Материалы			
	Li	LiH	Li <sub>2</sub> O	LiF
Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,534	0,78	2,01	2,63
Температура плавления, °C	180	691	1727	849
Теплоемкость, Дж/кг·К	3800	3600	2500	2200
Относительный выход нейтронов	1	0,72	0,47	0,33
Пробег в твердом веществе, мкм	140	77	40	33
Надкритический пробег, мкм	2,2	1,21	0,63	0,52

35 По комплексу теплофизических, технологических свойств и стоимости наиболее подходящим материалом для реализации способа является оксид лития.

Зададимся перегревом Li<sub>2</sub>O, равным 500°C. При этом потребуются для вышеоговоренного режима НЗТ около 8 кг или примерно 4 л порошка.

Необходимо будет выполнить следующие требования:

- 40
- средний размер зерен <0,63 мкм, выбираем 0,5 мкм,
  - расход порошка  $8000/500=16$  г/с,
  - концентрация  $10^{-2}$  (плотность 2,01 кг/м<sup>3</sup>), при глубине канала 5 мм это соответствует средней скорости перемещения порошка в рабочем объеме  $\sim 0,5$  м/с.

45 Возможно использование известной системы охлаждения, например охлаждение задней стенки канала потоком жидкости или газа (фиг.7).

При этом можно резко снизить количество и расход реакционного материала Li<sub>2</sub>O и использовать его только для надкритической реакции. Зададимся средним размером зерна порошка 0,2 мкм (три надкритических пробега,  $m=3$ ), возьмем прежнее сечение канала истечения  $5 \times 50$  мм. Теперь при вышеуказанных режимах расход порошка будет в  $\sim 60$  раз  
50 меньше и потребуются только 125 г порошка (или  $\sim 60$  см<sup>3</sup>).

Разделение объемов канала взвеси и протонопровода можно реализовать с использованием перемещающейся по окну протонопровода тонкой ленты из легких металлов (бериллий, алюминий), перематываемой с барабана на барабан. При этом



необходимо поднять энергию протонов на величину потерь, которая в ленте из бериллия толщиной 10 мкм составит ~20 кэВ. Потребуется всего лишь 300 г ленты шириной 60 мм.

Аналогичное решение можно использовать также взамен традиционного охлаждения противоположной стенки для аккумуляирования тепловой энергии. При этом ленту толщиной 5 0,3-0,5 мм из бериллия или алюминия (фиг.9) перематывают с барабана на барабан со скоростью  $V_1$  вдоль противоположной стенки канала перемещения взвеси. Поскольку материал ленты обладает высокой теплоемкостью, она будет эффективно аккумуляировать тепло, выделяемое при торможении заряженных частиц. Однако в этом случае такой ленты из алюминия потребуется уже около 10 кг.

10 Наконец, можно в  $K$  раз при тех же исходных режимах увеличить выход нейтронов (фиг.10), если увеличить слой надкритического пробега в  $K$  раз и приложить по вектору протонного потока в рабочей зоне взвеси ускоряющее напряжение, равное  $(K-1) \cdot (1,91-1,88)$  МэВ. При этом потерявшие энергию протоны, ускорившись, снова будут способны вступить в ядерную реакцию, сечение которой как бы увеличится в  $K$  раз.

15 Промышленная применимость.

С помощью заявляемого способа могут быть созданы нейтронопродуцирующие мишенные узлы для использования в нейтронозахватной терапии. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что создание такого узла может быть осуществлено с использованием существующих на сегодняшний день технологий. Использование иного 20 агрегатного состояния активного материала обеспечивает упрощение и удешевление получения нейтронов для использования в медицинских целях.

#### Формула изобретения

1. Способ получения нейтронов, основанный на ядерной реакции в активном материале 25 динамической мишени, облучаемой потоком ускоренных заряженных частиц, отличающийся тем, что в качестве мишени используют перемещаемый перпендикулярно пучку заряженных частиц поток разреженных частиц твердого активного материала.

2. Способ получения нейтронов по п.1, отличающийся тем, что перемещение частиц активного материала осуществляют с использованием гравитационных сил.

30 3. Способ получения нейтронов по п.1, отличающийся тем, что перемещение частиц активного материала осуществляют в потоке легкого разреженного газа под действием перепада давлений между объемами подачи и приема частиц активного материала.

4. Способ получения нейтронов по п.3, отличающийся тем, что давление в объеме подачи частиц активного материала выбирают равным 10-100 мм рт.ст., а в объеме приема 35 - менее 1 мм рт.ст.

5. Способ получения нейтронов по п.2, отличающийся тем, что на активный материал в объеме подачи частиц активного материала производят вибрационное воздействие.

6. Способ получения нейтронов по п.3 или 4, отличающийся тем, что осуществляют перемешивание активного материала в объеме подачи частиц активного материала.

40 7. Способ получения нейтронов по любому из пп.2-6, отличающийся тем, что объемную концентрацию и скорость перемещения частиц активного материала в рабочей зоне обеспечивают путем дросселирования и формирования сечения потока частиц активного материала на входе в рабочую зону.

8. Способ получения нейтронов по любому из пп.3-7, отличающийся тем, что размер 45 частиц активного материала, толщину слоя частиц активного материала и их концентрацию выбирают из условия обеспечения полного пробега  $\delta$  заряженных частиц в указанном слое.

9. Способ получения нейтронов по п.8, отличающийся тем, что в качестве активного материала используют твердый литийсодержащий материал, а в качестве заряженных частиц - протоны.

50 10. Способ получения нейтронов по п.9, отличающийся тем, что концентрацию частиц активного материала выбирают равной  $10^{-2}$ - $10^{-3}$  исходной плотности твердого материала, а средний размер частиц выбирают, как минимум, на порядок меньше величины пробега  $\delta$ .

11. Способ получения нейтронов по любому из пп.2-6, отличающийся тем, что

толщину слоя частиц активного материала и его концентрацию выбирают из условия обеспечения пробега  $\Delta$  заряженных частиц в надкритической реакции, при этом стенку рабочей зоны в области выхода нейтронов охлаждают.

5 12. Способ получения нейтронов по п.11, отличающийся тем, что концентрацию частиц активного материала выбирают  $\sim 10^{-4}$  исходной плотности твердого материала, а средний размер частиц - примерно на порядок меньше величины надкритического пробега.

13. Способ получения нейтронов по п.12, отличающийся тем, что толщину слоя частиц активного материала выбирают в К-раз больше, при этом по толщине потока частиц активного материала в рабочей зоне прикладывают ускоряющее напряжение  $U=(K-1) \cdot (1,91-1,88)$  МэВ, где  $K=2-10$ .

10 14. Способ получения нейтронов по любому из пп.2-13, отличающийся тем, что осуществляют герметичное разделение канала потока частиц активного материала от канала подачи заряженных частиц тонкой лентой из легкого металла с высокой теплоемкостью, которую перемещают перпендикулярно оси канала подачи ускоренных заряженных частиц.

15 15. Способ получения нейтронов по любому из пп.10-14, отличающийся тем, что охлаждение стенки рабочей зоны в области выхода нейтронов осуществляют потоком жидкости или газа.

20 16. Способ получения нейтронов по любому из пп.10-14, отличающийся тем, что охлаждение стенки рабочей зоны в области выхода нейтронов осуществляют путем перемещения относительно указанной стенки ленты, выполненной из материала с высокой теплопроводностью, при этом перемещение производят перпендикулярно оси канала подачи ускоренных заряженных частиц.

25 17. Способ получения нейтронов по любому из пп.1-16, отличающийся тем, что скорость потока частиц активного материала выбирают равной 0,2-2,0 м/с.

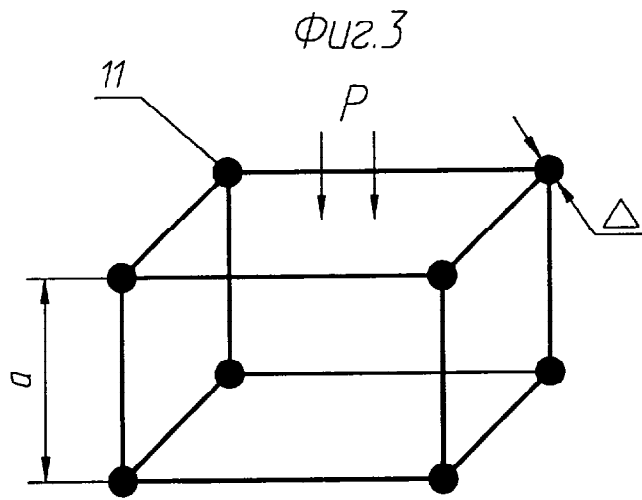
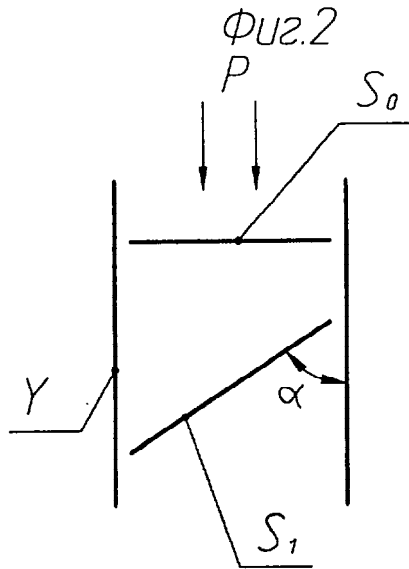
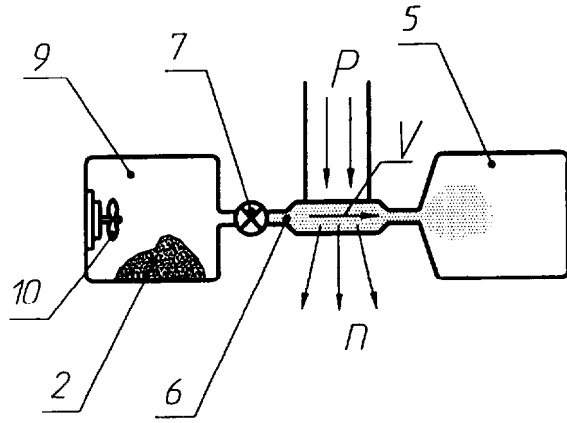
30

35

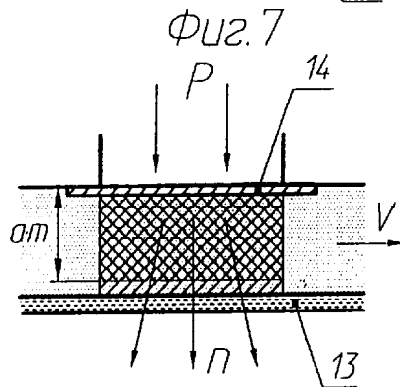
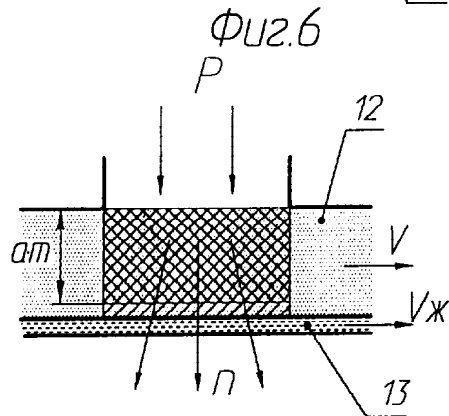
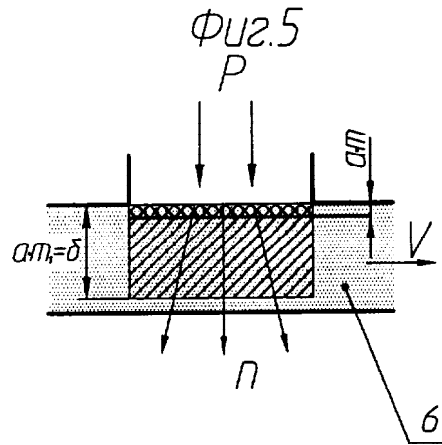
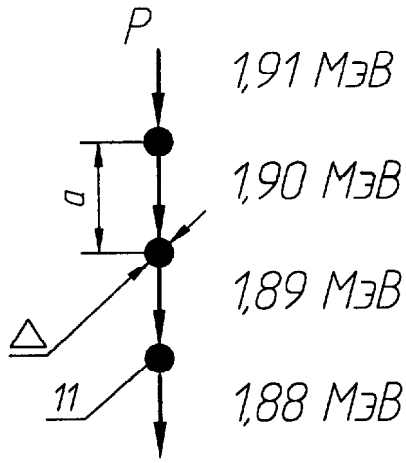
40

45

50



Фиг.4



Фиг. 8

