



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**(21)(22) Заявка: **2010118988/07, 13.05.2010**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**13.05.2010**

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **13.05.2010**(45) Опубликовано: **27.10.2011** Бюл. № 30(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2253914 C2, 27.02.2005. RU 2187852 C1, 20.08.2002. GB 2236210 A, 27.03.1991. DE 19949583 A1, 20.04.2000. US 5307390 A, 26.04.1994.**

Адрес для переписки:

**123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1,  
НИЦ "Курчатовский институт", Заместителю  
руководителя Исполнительной дирекции С.Е.  
Горчакову**

(72) Автор(ы):

**Столяревский Анатолий Яковлевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

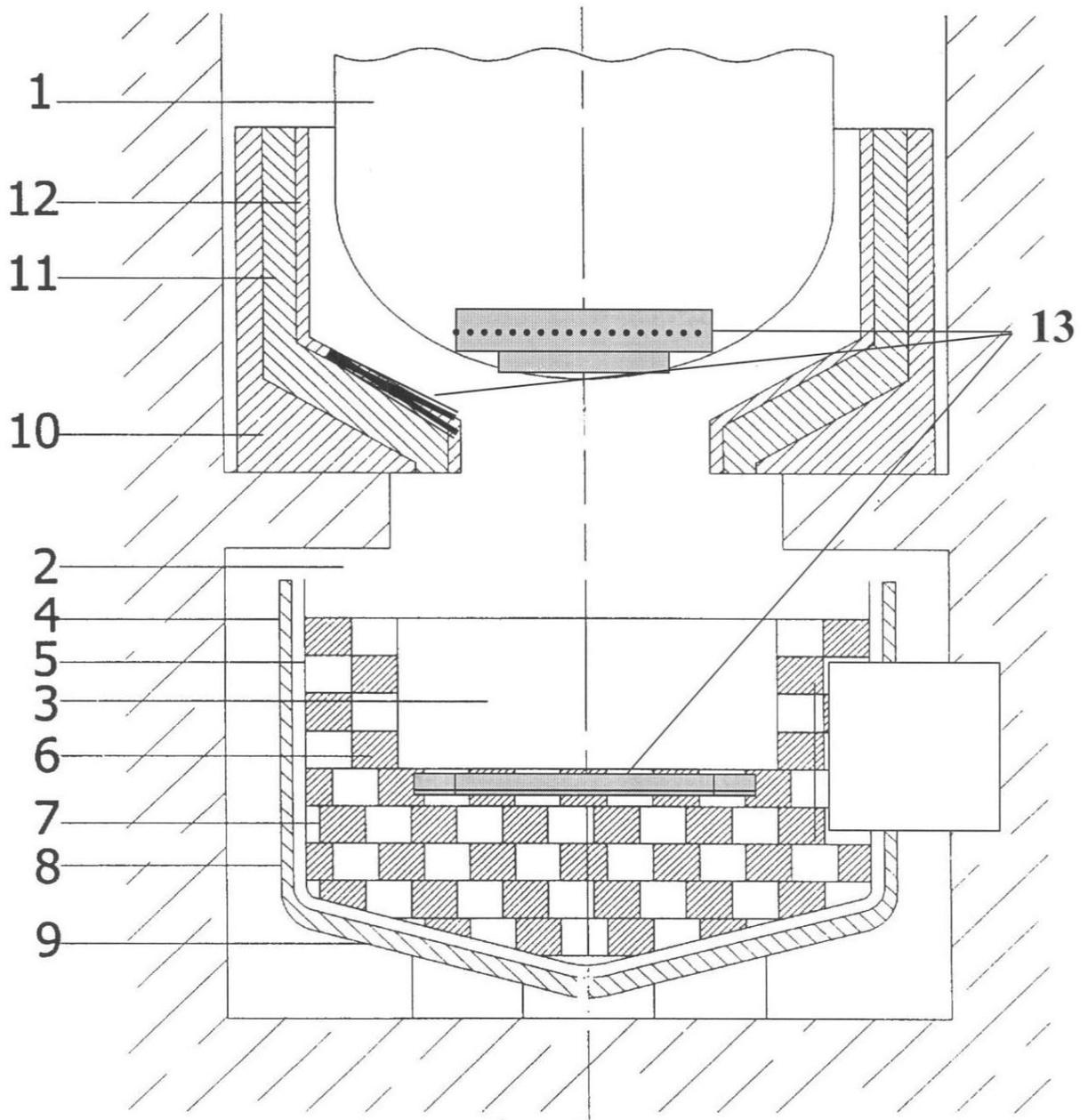
**Федеральное государственное бюджетное  
учреждение "Национальный  
исследовательский центр "Курчатовский  
институт" (RU)**

**(54) СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

(57) Реферат:

Изобретение относится к системам локализации аварии на АЭС для улавливания компонентов активной зоны ядерного реактора и их обломков из разрушенного корпуса. Способ локализации расплава включает в себя улавливание, выдерживание и охлаждение расплава в резервуаре, расположенном под реактором. Охлаждение расплава осуществляется путем теплосъема в атмосферу через защитный экран и при контакте расплава с охлаждаемыми стенками резервуара. Расплав перед выходом из реактора или в процессе заполнения резервуара смешивают с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, в частности с оксидами гафния, тантала, европия, гадолия. Устройство локализации расплава активной зоны

включает резервуар для улавливания и выдерживания расплава, расположенный под реактором и покрытый слоем материала, плавящегося при контакте с расплавом, систему охлаждения. В тракте прохождения расплава из активной зоны в резервуар размещен по крайней мере один сегментированный брикет, имеющий капиллярную структуру и удерживающий в каркасе тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны. Каркас сегментированного брикета имеет более высокую температуру плавления, чем тугоплавкие соединения тяжелых элементов, и в сечении имеет форму шестерни. Технический результат - снижение опасности образования составов с повышенными характеристиками размножения нейтронов. 2 н. и 6 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(51) Int. Cl.  
*G21C 9/00* (2006.01)

**(12) ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2010118988/07, 13.05.2010**

(24) Effective date for property rights:  
**13.05.2010**

Priority:

(22) Date of filing: **13.05.2010**

(45) Date of publication: **27.10.2011 Bull. 30**

Mail address:

**123182, Moskva, pl. Akademika Kurchatova, 1,  
NITs "Kurchatovskij institut", Zamestitelju  
rukovoditelja Iсполnitel'noj direktcii S.E.  
Gorchakovu**

(72) Inventor(s):

**Stoljarevskij Anatolij Jakovlevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
uchrezhdenie "Natsional'nyj issledovatel'skij  
tsentr "Kurchatovskij institut" (RU)**

**(54) METHOD AND DEVICE OF LOCALISATION OF CORE MELT OF NUCLEAR REACTOR**

(57) Abstract:

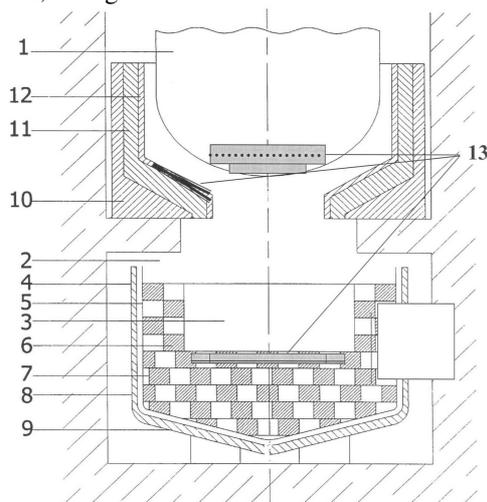
FIELD: power industry.

SUBSTANCE: core melt localisation method involves collection, exposure and cooling of core melt in the tank located under the reactor. Core melt cooling is performed by heat release to atmosphere through protective screen and at contact of core melt with cooled walls of the tank. Before the core melt leaves the reactor or when it is filling the tank, it is mixed with heat-resistant compounds of heavy elements absorbing thermal neutrons, namely with hafnium, tantalum, europium and gadolinium oxides. Core melt localisation device includes tank for collection and exposure of core melt, which is located under the reactor and covered with layer of material melting at contact with core melt, and cooling system. In path of core melt moving from active zone to the tank there arranged is at least one segmented briquette having capillary structure and retaining in the framework the heat-resistant compounds of heavy elements absorbing thermal neutrons. Framework of segmented briquette has melt

temperature which is higher than that of heat-resistant compounds of heavy elements, and has the shape of gear in cross section.

EFFECT: reducing the danger of formation of compounds with improved characteristics of neutron multiplication.

8 cl, 3 dwg



Фиг. 1

RU 2 4 3 2 6 2 8 C 1

RU 2 4 3 2 6 2 8 C 1

Изобретение относится преимущественно к системам локализации аварии на АЭС для улавливания компонентов активной зоны и их обломков из разрушенного корпуса.

5 Известно устройство для улавливания расплавленных материалов из активной зоны, содержащее расположенную ниже корпуса реактора и предназначенную для охлаждающей жидкости камеру, в которой установлено средство для приема расплава, отличающееся тем, что средство для приема расплава выполнено в виде вертикальных модулей, имеющих в поперечном сечении форму многоугольника, 10 установленных друг относительно друга с зазором по смежным граням, верхние концы которых соединены, по крайней мере, на части ширины грани [Патент RU 2100853, кл. G21C 9/016, заявлено 27.04.95].

Устройство локализации расплава для АЭС с ВВЭР является новым инженерным проектом в ядерной энергетике и не имеет аналогов в практике реакторостроения. 15

Высокоэнергетический расплавленный материал, содержащий как тяжелые оксиды, так и продукты деления, представляет собой сложную для описания и моделирования систему, способную претерпевать различные фазовые превращения и вступать во взаимодействие с материалами ограждающих конструкций. Экспериментальные 20 исследования подтвердили представления специалистов о том, что большая часть процессов такого взаимодействия может вызвать необходимость решения сложных проблем ядерной безопасности, водородобезопасности, разрушения корпусных ограждений, паровых взрывов и других явлений, влияющих на целостность основных барьеров удержания радионуклидов в пределах защитной оболочки АЭС.

25 Методологические подходы и расчетно-экспериментальные работы различных исследовательских групп показали, что множественность возможных сценариев развития тяжелых аварий не позволяет однозначно выработать конкретный алгоритм и определить все необходимые параметры, требующиеся для решения проблемы локализации расплава топлива, вышедшего за пределы корпуса реактора. В силу 30 этого проектирование должно проводиться на основе консервативных представлений.

В проектах, создаваемых на базе АЭС предыдущего поколения, решение проблемы осложняется проектными ограничениями, предопределяющими размещение 35 устройства локализации расплава в пределах подреакторного пространства шахты реактора.

Главная задача устройства локализации расплава - принять и как можно быстрее охладить расплав топлива в объемах локализации с целью не допустить его разогрева, выхода нелетучих продуктов деления, минимизировать образование водорода и 40 предотвратить образование повторной критичности.

Известны так называемые «тигельные» устройства для улавливания расплавленных материалов из активной зоны, содержащие расположенную в подреакторном пространстве бетонной шахты ловушку, охлаждаемая оболочка которой выполнена в 45 форме сосуда, днище которого углублено к центру, в ловушке установлена стальная корзина с жертвенными материалами-разбавителями урансодержащей и стальной составляющих кориума, причем материалы-разбавители в корзине установлены в виде ячеистой структуры (Патент RU 2122246, кл. G21C 9/016, 13/10, заявлено 28.01.97, патент RU 2165108, кл. G21C 9/016, 13/10, заявлено 10.04.2001, патент RU 2253914, прототип, кл. G21C 9/016, заявлено 2003.08.18).

50 В одном из вариантов, представленных на чертеже - прототипе устройства, система содержит ядерный реактор 1, размещенный в бетонной шахте 2. В подреакторном пространстве бетонной шахты расположена ловушка 3, внутри охлаждаемой

оболочки 4 которой размещена стальная корзина 5 с брикетами жертвенного материала-разбавителя 6, заключенными в стальные обечайки 7. Охлаждаемая оболочка состоит из боковой стенки 8 и днища 9. Между реактором и ловушкой размещено направляющее устройство 10, стенки которого покрыты термостойким бетоном 11 с покрытием из легкоплавкого бетона 12.

В тигельных устройствах локализации расплава предполагается, что, будучи расплавленными при нагреве от кориума, жертвенные материалы образуют с урансодержащей оксидной частью кориума композицию удельной плотностью менее  $6,4 \text{ кг/м}^3$ , что, в свою очередь, позволит обеспечить всплытие оксидной фазы в верхнюю часть ловушки, где за счет воды, подаваемой на расплав из находящихся в бетонных стенах шахты труб, будет отводиться тепло, выделяемое распадом радионуклидов топлива активной зоны.

Нерешенной в таких ловушках остается задача охладить расплав настолько быстро, чтобы избежать серьезных негативных явлений: образования в большом количестве водорода, кипения урансодержащей части кориума, выхода его за пределы удерживающей корзины и защитной оболочки в окружающую среду.

Проанализируем трудности обоснования тигельного типа устройств локализации расплава, особенно в части взаимодействия расплава топлива с жертвенными материалами. Трудности связаны с физическими явлениями, протекающими в ходе тяжелой аварии и определяющими работоспособность и основные требования к техническим решениям.

Расчеты нестационарных температурных условий, которые возникают при удержании расплава топлива в пределах объема, заполненного жертвенными материалами на основе гематита и оксида алюминия, а также эксперименты показали, что образующаяся на поверхности кассет корка (краст, гарниссаж) из затвердевающего расплава создает барьер для массообменных процессов и отвода тепла. Такой барьер не позволяет развиваться процессам взаиморастворения жидких фаз расплава топлива и жертвенных материалов, что служит основным препятствием для реализации концепции, основанной на гравитационной инверсии слоев в целях последующего охлаждения верхней корки водой.

Разогрев расплава топлива, не охлаждаемого с нужной эффективностью, может привести за короткое время к выходу системы за допустимые пределы (начало кипения диоксида урана). В то же время существует опасность проплавления тяжелых оксидов вниз с выходом из защитной оболочки. Благоприятствует этому опасному процессу химическое взаимодействие (абляция) расплавленного топлива со стальной стенкой, затем - кориума с бетоном.

В вариантах устройств локализации расплава в виде тигля при нагреве жертвенными материалами разложение гематита приводит к выходу в устройство нагретых до 1773 К и выше потоков кислорода, вызывающих дополнительное выделение тепла в процессах окисления компонентов расплава топлива и ограждающих конструкций.

В частности, показано, что цилиндрические образцы железа и углеродистой стали диаметром 1,5 и 3 мм воспламеняются в кислороде в момент потери оксидной пленкой защитных свойств, предположительно в результате плавления ее основного компонента - оксида железа FeO при 1644 К. Температура воспламенения не зависит от давления кислорода в диапазоне 0,2-20 МПа. Воспламенению предшествует значительный (~100 К) саморазогрев образца за счет тепла реакции окисления металла. Воспламенялась фольга из углеродистой стали в кислороде при 0,14-0,6

МПа) при начальной температуре поверхности не менее 1233 К.

Даже без учета горения стали в верхней части ловушки энерговыделение, вызываемое химическими реакциями в оксидной фазе, составит 60-70 тыс. МДж и будет приходиться в основном на урансодержащую фазу расплава топлива, т.е. суммироваться с основным энерговыделением. Выход кислорода определяется, в первую очередь, разложением основы жертвенных материалов - гематита. Суммарное выделение кислорода только в оксидном слое по расчетам составит более 1000 кг, или около 1000 м<sup>3</sup>, что более чем в 100 раз превышает объем самого жертвенного материала. При этом расчет на вовлечение в отвод тепла основной массы жертвенных материалов, как показали расчеты и эксперименты, не оправдывается: в силу крайне низкой теплопроводности жертвенных материалов ( $\lambda=0,5$  Вт/м·К) удается расплавить только прилегающий к расплаву топлива слой жертвенных материалов. Тем самым вместо отвода тепла контакт жертвенных материалов с расплавом топлива приведет к дополнительному выделению тепла. В устройстве локализации расплава в виде тигля граница «расплав-жертвенные материалы» будет располагаться вертикально, что приведет к тому, что газовыделение кислорода из жертвенных материалов будет создавать барьерный газожидкостный слой, также препятствующий массо- и теплообмену и позволяющий расплавленному жертвенному материалу всплывать без контакта с расплавленным топливом, отделенным от границы коркой тугоплавких оксидов. Такое поведение жертвенных материалов подтвердили и эксперименты.

При высокой скорости процесса разбавления тяжелых оксидов выделение тепловой энергии за счет происходящих при этом экзотермических реакций вызовет уже через несколько минут разогрев расплава до температуры кипения его составляющих. В частности, при реакции 19 т Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с 11 т циркония из первой порции выделится 73 700 МДж энергии или при характерной скорости этого процесса ~400 с мощности нагрева 184 МВт. Мощность нагрева при реакции 16,5 т гематита с 10,7 т хрома составит 122 МВт. Окисление 131 т стали с эмпирически установленной скоростью до 25%/мин при общей продолжительности процесса в 10-12 минут приведет к выделению 590 тыс. МДж или более 1000 МВт мощности внутреннего нагрева тигля с расплавом. При такой мощности (более 1500 МВт тепла) скорость нагрева расплава превысит 1000 К/мин, что вызовет взрывное вскипание всего расплава.

Вместе с тем даже без учета химических реакций и без учета термического сопротивления на границе сред в виде корки и газожидкостного барьера внутри столба расплава топлива будет развиваться температура, приводящая к кипению диоксида урана и других компонентов расплава.

Для иллюстрации масштаба возможных температурных градиентов приведем оценки температур. Расчеты показывают, что при диаметре столба расплава топлива 300 мм перепад температур внутри столба  $\Delta T_{ст}$  без учета конвекции, т.е. при передаче тепла внутри неподвижного слоя только теплопроводностью, составит:

$$\Delta T_{ст} = q_v r^2 / 4\lambda = 2,3 \cdot 10^6 \cdot 2,25 \cdot 10^{-2} (4 \cdot 6)^{-1} \approx 2200 \text{ К},$$

что при температуре на поверхности жидкого расплава кориума 2300 К ( $T_{ликв}$ ) могло бы в режиме подавленной конвекции создать температуру в центре столба выше 4500 К. При больших размерах зоны тепловыделения рост температуры будет пропорционален квадрату размера зоны, т.е. уже при диаметре 0,6 м расчетный перепад температуры внутри зоны при отсутствии развитой конвекции мог бы достичь 8800 К. В этой связи особое значение придается теплофизическому расчету процессов, происходящих внутри корзины расплава.

Без создания условий для отвода внутреннего тепла столб расплава топлива с

температурой в центре до 4000 К и выше и массой около 3 т (при высоте 3 м) будет в течение очень короткого времени проплавливать любые известные на сегодня материалы. Самый опасный процесс начнется при выходе расплава топлива на стенку теплообменника, где оксидная часть расплава начнет интенсивно взаимодействовать со стальной стенкой устройства со скоростью химического взаимодействия (абляции) до нескольких миллиметров в минуту при температурах на внутренней поверхности стенки около 1300 К и выше. Если требуемый отвод тепла не обеспечивается, происходит быстрый (до 1500 К/ч) разогрев расплава топлива с опасностью его последующего выхода за пределы корзины и герметичной оболочки.

Дополнительными проблемными факторами выступают также процессы взаимодействия расплавленного топлива с охлаждающей водой. При ускоренной подаче воды (сразу вслед за выходом первой порции из корпуса реактора) резко возрастает генерация водорода в устройстве локализации расплава, что вступает в противоречие с требованием о минимизации выхода водорода, а также возникает вероятность паровых взрывов. Уже через 1 ч после начала подачи воды ее слой на поверхности окисленной корки создаст бассейн, в который с высоты около 3 м будет падать высокоэнергетический расплав топлива второй порции. Возможен сценарий, когда в пульсационном режиме сначала выйдет относительно небольшая (1-10 т) порция расплава (стали или тяжелых оксидов), которая вызовет подачу воды, а основные порции начнут выходить с задержкой, например в 0,5-1 ч, что приведет к тому, что расплавленное топливо будет падать в емкость, заполненную водой (за 1 ч выходит около 20 м<sup>3</sup>) в объеме, равном свободному пространству в корзине. Как считают специалисты, «падение жидкого расплава в этот бассейн приведет к паровым взрывам еще большей интенсивности, в результате чего может быть разрушено не только само устройство для улавливания расплавленных материалов активной зоны, но и бетонная шахта с герметичной зоной».

Падение второй порции расплава в объем, заполненный водой, может вызвать паровые взрывы в силу того, что высота слоя воды за время, отведенное на выход второй порции (1800 с), при попадании с расходом 5,5 кг/с в единственно незапятнанную оставшуюся полость воздуха в центре корзины диаметром 3 м составит около 1,5 м.

Многочисленные эксперименты показали, что падение, например, всего 20 кг расплава в емкость с водой объемом 0,5 м<sup>3</sup> (стенд Premix в Карлсруэ) приводит к паровым взрывам с ростом давления свыше 2 МПа, что разрушило установку.

В Сандиевских лабораториях (США) в известной серии экспериментов FITS по изучению условий возникновения паровых взрывов при тяжелых авариях на АЭС паровые взрывы происходили при объемах воды от 44 л до 0,25 м<sup>3</sup> при массе расплава от 3 до 20 кг. Давление на фронте ударной волны составляло около 20 МПа при скорости 200-600 м/с.

Имеющиеся на сегодня данные не позволяют исключить возникновение паровых взрывов высокой интенсивности при подаче воды как на расплавленную сталь, так и на высокотемпературные корки оксидного состава. Опасность несет и образование в этих процессах водорода. Нагретые металлы уже при температуре свыше 1300 К интенсивно взаимодействуют с водой и водяным паром с образованием водорода. Экспериментальные работы подтвердили значимость процессов образования водорода при высокотемпературном окислении водой и водяным паром расплава стали как дополнительного источника водорода, требующего учета при водородобезопасности. Скорость образования водорода по этому источнику генерации достигает 60 мг/(см<sup>2</sup>•мин), что приводит к образованию 500 кг/ч. С учетом

выхода водорода и на первой стадии аварии (500-600 кг) концентрация водорода быстро становится взрывоопасной (превышение детонационного предела по тройной диаграмме) даже без учета одновременного выхода около  $1000 \text{ м}^3$  кислорода из разлагающегося гематита. С учетом кислорода выход на детонацию водорода может произойти еще быстрее (за 20-30 мин), что, в свою очередь, означает, что не могут быть выполнены условия водородобезопасности, а значит, и целостности контейнента.

Подаваемое на расплав большое количество воды требует и отдельного подхода к оценке подкритичности, которая должна рассматриваться на адекватной этому состоянию модели.

Если принять двухэтапный выход расплава из корпуса реактора, то первая порция с характерным объемом  $6,7 \text{ м}^3$  тяжелых оксидов (48 т) и  $11,4 \text{ м}^3$  стали (80 т) займет соответственно свободное пространство в слоях жертвенных материалов. Если также принять допущение, что корка, сразу же образующаяся и нарастающая на границе тяжелые оксиды - жертвенные материалы, не препятствует их массообмену, то цирконий будет взаимодействовать либо напрямую с гематитом, либо с кислородом, который выделяется при термоллизе гематита. В жертвенных материалах при нагреве со стороны тяжелых оксидов будет образовываться и всплывать герцинит  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ . Оксид алюминия будет также восстанавливаться цирконием либо до металлического алюминия, образующего с оксидами железа термитную смесь, сгорание которой проходит с быстрым выделением большого количества энергии, либо до летучего  $\text{Al}_2\text{O}$ . Смесь компонентов тяжелые оксиды - оксид алюминия при температурах выше 2420 К кипит, что было определено в экспериментах. Продукт термолиза гематита и окисления стали -  $\text{FeO}$  - с оксидом циркония образуют легкоплавкую эвтектику при 1603 К. Выплавляемая из блоков сталь будет частично окисляться кислородом и всплывать. В вышерасположенном расплаве стали будет идти как окисление железа кислородом из гематита и окружающей атмосферы, так и реакция экзотермического окисления хрома гематитом. В слое тяжелых оксидов хрома нет, а образующийся в верхних слоях (расплава стали) его оксид в силу малой плотности ( $5,2 \text{ т/м}^3$ ) в слой тяжелых оксидов опуститься не может. Таким образом, в слое тяжелых оксидов мог бы при условии всех принятых допущений образоваться следующий состав: 37,5 т  $\text{UO}_2$ , 11,2 т  $\text{ZrO}_2$  и 5,3 т  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с плотностью  $8,1 \text{ т/м}^3$ . Изменения плотности вышерасположенного слоя расплава стали будут определяться образованием и растворением оксида железа  $\text{FeO}$  и оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и окончательно создадут состав, т: 132 Fe, 18 FeO, 15,6  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 5 Ni, с плотностью  $7,23 \text{ т/м}^3$ . Таким образом, условий для гравитационной инверсии не возникает.

Расплавы оксидов циркония, железа и алюминия, не растворенные в слоях тяжелых оксидов и стали, будут всплывать и образовывать поверхностный слой. Цемент из связки жертвенных материалов, содержащий  $\text{CaO}$  и оксид кремния, будет разлагаться с выделением газов, образовывать соединения типа феррита кальция ( $\text{CaFeO}_2$  или  $\text{CaFe}_4\text{O}_7$ ),  $\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  и др. и также всплывать. Следует иметь в виду, что, как показали эксперименты по взаимодействию  $\text{FeO}$  с  $\text{ZrO}_2$ , скорость растворения оксида циркония в расплаве оксидов железа ниже скорости передвижения расплава в керамике, что будет накладывать дополнительные ограничения на разбавление тяжелых оксидов компонентами жертвенных материалов. Легкие керамические блоки с кассетами при расплавлении стальных удерживающих оболочек и фиксаторов скорее всего будут дефрагментированы и просто неупорядочно всплывать в верхнюю

часть, блокируя теплоотвод к верхним слоям и не оставляя свободного объема для приема второй порции расплава.

Обосновать же период и другие количественные параметры по выходу расплава топлива из корпуса реактора в устройство локализации расплава трудно в силу множественности процессов и сценариев протекания тяжелой аварии и значительных неопределенностей в изучении определяющих эти процессы факторов. В частности, в поведении расплава, как показали эксперименты на стенде «Расплав», возможны неожиданные эффекты, определяемые весьма малыми примесями. Для того, чтобы быть уверенным, что нежелательная сегрегация не произойдет, необходимо дополнительно изучить влияние таких примесей, как углерод, бор (0,43 т), кальций (0,3 т), титан, кремний и др., которые присутствуют в компонентах активной зоны, внутрикорпусных устройствах, стальных и бетонных конструкциях, взаимодействующих с расплавом, композиции перлитной стали в корзине и блоках, самом жертвенном материале. Слой урансодержащих компонентов станет еще тяжелее и концентрация энерговыделения сместится в нижний слой, реагирующий с бетоном, где расплав топлива остановить нечем.

Эрозия бетона по многочисленным экспериментам может идти со скоростью 4-5 мм/мин и выше. Как только расплав тяжелых оксидов высокой температуры дойдет до стальной стенки, остановить интенсивную абляцию за счет охлаждения стенки водой будет нельзя в силу высокого теплового потока, приводящего к кризису теплообмена. Изложенное вызывает необходимость обобщающего анализа экспериментальных данных по абляции стали, кипению расплава и выбросам газа и расплава топлива в зоне контакта со сталью.

Процессы на границе «тяжелые оксиды-жертвенные материалы», «сталь-жертвенные материалы» и «жертвенные материалы-сталь» являются во многом определяющими для реализации концепции устройства локализации расплава. Соответствующих диаграмм между выбранными «легкими оксидами» и нестехиометрическими оксидами урана, циркония и растворами на их основе в настоящее время нет. В то же время расчет процесса на границе тяжелые оксиды - жертвенные материалы может быть выполнен надежно путем простого и наглядного решения уравнения теплового баланса с учетом конвективного потока на границе жидкого расплава, внутренних источников тепловыделения, в том числе химических, фазовых переходов (плавления, образования корки и термолиза) для нестационарного поля температуры. Такое решение может быть проверено известными аналитическими решениями, надежными (в первую очередь по интерпретации результатов) экспериментами.

Алгоритм был реализован и проверен на правильность результатов изложенными методами, в том числе по экспериментам с модельным расплавом. Дополнительно программа была оснащена модулями внутреннего энерговыделения, конвективного теплообмена, эффектов термолиза жертвенных материалов.

Результаты вариантных расчетов показали для различных участков расплава, что на границе тяжелые оксиды - жертвенные материалы всегда образуется корка, как это и следует из существа процесса. Именно корка, как это и подтвердили эксперименты, в частности Sacr-4, и является барьером для массообмена и термическим сопротивлением при передаче тепла от расплава топлива к жертвенным материалам.

Расчет изменения температуры расплава топлива (тяжелых оксидов) и контакта расплава с жертвенными материалами показал, что при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha$ , равном 240 (расчеты с фиксированным коэффициентом  $\alpha$ , обозначенные далее

как N2), температура контакта соответствует температуре плавления жертвенных материалов (2000 К для смеси гематита с оксидом алюминия) только через 40-50 мин и к моменту разогрева расплава до предельной температуры 3800 К (кипения диоксида урана) примерно через 2 ч расплавляется менее 300 мм, т.е. менее половины слоя жертвенных материалов, окружающего канал (в среднем ширина жертвенных материалов вокруг расплава составляет 1,5 размера кассеты, т.е. 600 мм). Толщина корки в зоне расплава при этом меняется, достигая максимальной толщины около 50 мм примерно через 20 мин и затем снижается до 10-15 мм.

Для зон с развитой конвекцией, расчет которой проводился по зависимостям с корректировкой зависимости критерия Рэля (Ra) от критерия Гроссгофа (Gr) по подогреву  $\Delta T$ , как это рекомендуется для естественной конвекции в условиях фазового перехода, качественно ход процесса остается прежним, хотя за время около 8000 с (более 2 ч) зона плавления жертвенных материалов охватывает к концу данного периода слой толщиной 1,5 кассеты с жертвенными материалами без превышения расплавом тяжелых оксидов температуры 3300 К.

Расчеты, проведенные для слабоперегретого расплава топлива (начальная температура  $T_{нач}=2873$  К), показали, что для конвекции в области малой надкритичности с коэффициентом Нуссельта (Nu), определяемым по N1 с коэффициентом 0,5, расплав топлива перегревается без выхода температуры контакта тяжелых оксидов (корки) с жертвенными материалами даже на начало плавления и уже к  $\tau=3800$  с температура расплава достигает 3773 К. Повышение начального перегрева до  $T_{нач}=2973$  К не изменяет картину процесса (выход на температуру кипения расплава 3773 К происходит немного раньше на  $\tau=3600$  с и толщина корки к этому моменту меняется с 79 на 77 мм).

По расчету с  $\alpha=60$  процесс расплава топлива выходит на кипение диоксида урана и других тугоплавких оксидов ( $T>3773$  К), составляющих расплав, к  $\tau=3300$  с без начала плавления жертвенных материалов. При  $\alpha=120$  и  $T_{нач}=2973$  К это время почти не меняется ( $\tau=3200$  с).

При увеличении коэффициента теплоотдачи до  $\alpha=240$  температура расплава выходит на уровень 3773 К позже (примерно через 2 ч), пройдя значение 3673 К на момент  $\tau=4716$  с. Зона плавления жертвенных материалов в этом варианте к моменту выхода расплава топлива на кипение составляет 271 мм, т.е. не превышает размеров кассеты.

В центральном объеме устройства, не занятом кассетами, возможности по отводу тепла расплава еще хуже, чем в каналах, окруженных жертвенными материалами, поскольку присоединенная тепловыделяющая масса расплава почти не имеет отвода тепла вверх (потоки тепла, отводимые излучением, после прогрева окружающих конструкций падают до низких в сравнении с энергосодержанием значений). Отвод тепла вбок (радиус «лужи»  $r=1500$  мм) даже при хорошо развитой конвекции (в расчетах по N1 она моделировалась учетом  $\Delta T$  в определении Gr, а затем Ra и Nu), обеспечивает лишь относительно быстрый выход температуры в контакте корки расплава с жертвенными материалами на уровень плавления (1973К) примерно через 1300 с при  $T_{ликв}=2823$  К и  $T_{нач}=3073$  К, однако не способствует достаточному отбору тепла, что приводит к выходу на кипение расплава топлива ( $T=3773$  К) уже к  $\tau=1600$  с. Снижение в расчете температуры ликвидуса до 2573 К не повлияло на скорость разогрева расплава, но ускорило разогрев жертвенных материалов и его выход на плавление, ширина расплава увеличилась в сравнении с предыдущим вариантом с 5 до 20 мм (к  $\tau=1600$  с).

Сильное влияние коэффициенты теплоотдачи будут оказывать на продвижение расплава топлива вниз после разогрева до температуры выше 3300 К. Расплав может идти не только в сторону к теплообменнику, но и вниз к днищу, куда двигаться ему помогают гравитационные силы, а удаление газожидкостного слоя расплавляемого гематита (своего рода смазки) из под столба расплава топлива происходит путем простого выдавливания собственной массой столба расплава топлива.

Из результатов расчета такого процесса видно, что при начальной температуре 3473 К и расчете коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  по зависимостям, рекомендуемым для потоков тепла вниз ( $C=2,14$ ,  $n=0,1$ ), коэффициенте теплоотдачи от нижнего слоя к тепловоспринимающей среде, равном 10, и температуре ликвидуса расплава топлива, равной 2573 К, время проплавления подложки жертвенных материалов (бетона) толщиной 0,6 м для слоя расплава с начальной толщиной, превышающей 0,4 м, составляет примерно 2 часа. Увеличение потока тепла к охлаждающей нижней уровне среде путем увеличения коэффициента теплоотдачи до  $1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$  от тигля к воде приводит через 2-2,5 часа к увеличению потока тепла от тигля до уровня, который превысит критический (для направления вниз:  $200\text{-}300 \text{ кВт/м}^2$ ) после выхода расплава топлива на остаточную толщину жертвенных материалов (бетона) 20-30 мм, после чего наступит кризис теплоотвода, проплавление стальной стенки и выход расплава топлива из тигля.

В этом сценарии важным является поведение расплава стали после его опережающего выхода в ловушку. При начальной температуре стали 3073 К и тепловыделении в ней  $0,23 \text{ МВт/м}^3$  примерно через 1 ч сталь застынет в твердое состояние и дальнейшее охлаждение на квазистационарном режиме быстро достигнет температуры контакта сталь-жертвенные материалы  $\approx 1373 \text{ К}$ .

В сложных гетерогенных многокомпонентных системах устройств локализации расплава, содержащих значительное количество делящихся материалов, особо значимо возникновение повторной критичности. В процессе аварии вода обязательно попадет внутрь устройства локализации расплава, например, при конденсации водяного пара или в незаполненные расплавом топлива зоны при подаче воды сверху или другим путем. Плотность воды составит в этом случае до  $0,5 \text{ г/см}^3$ , т.е. весьма опасную с точки зрения размножающих свойств концентрацию. Решение проблемы с помощью оксида гадолиния, замешиваемого в жертвенные материалы, выглядит проблематичным исходя из практической невозможности определить возможность его прохождения через краст, динамику и параметры его распределения в расплаве, устойчивость и ликвацию материалов, в том числе плутония, которого в расплаве до 500 кг, в период нахождения расплава топлива в тигле в высокотемпературном расплавленном состоянии. Длительность нахождения топлива в таком состоянии в тигле составляет около 1,5 лет.

Таким образом, в тигельных вариантах с жертвенными материалами-разбавителями в корзине установленными в виде ячеистой структуры не удастся предотвратить разогрев расплава до температур его кипения и избежать образования составов, обладающих повторной критичностью.

Задача изобретения - создать способ локализации расплава активной зоны ядерного реактора, в котором устранена опасность образования составов с повышенными характеристиками размножения нейтронов.

- Поставленная задача решается тем, что в способе локализации расплава активной зоны ядерного реактора, заключающемся в улавливании, выдерживании и охлаждении расплава в резервуаре, расположенном под реактором, процесс охлаждения расплава

осуществляется путем теплосъема в атмосферу через защитный экран и при контакте расплава со стенками резервуара, охлаждение которых производят путем подачи к ним охлаждающей среды, расплав перед выходом из реактора или в процессе заполнения резервуара смешивают с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны.

Кроме того:

- в качестве тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, выбирают оксиды элементов из ряда гафний, тантал, европий, гадолиний;

- смешивание расплава с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов ведут с помощью растворения тяжелых элементов в расплаве;

- смешивание расплава с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов ведут в нижней части корпуса реактора, на днище резервуара и элементах конструкции, направляющих поток расплава.

Для реализации предложенного способа решена задача создания устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора, включающее резервуар для улавливания и выдерживания расплава, расположенный под реактором и покрытый слоем материала, плавящегося при контакте с расплавом, систему охлаждения, в котором в тракте прохождения расплава, соединяющем активную зону реактора и резервуар, размещен по крайней мере один сегментированный брикет, имеющий капиллярную структуру и удерживающий в каркасе тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны.

Кроме того:

- каркас сегментированного брикета, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, имеет более высокую температуру плавления, чем тугоплавкие соединения тяжелых элементов, и выполнен из тонкого листа, ориентированного вертикально;

- сегментированный брикет, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, защищен от механического воздействия расплава;

- каркас сегментированного брикета, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, в сечении имеет форму шестерни.

На фиг.1 дано схемное решение предложенного способа локализации расплава активной зоны. На фиг.2 показано выполнение каркаса сегментированных брикетов из тонкостенных шайб, ориентированных вдоль опоры и образующих в сечении форму шестерни. На фиг.3 показано выполнение сегментированных брикетов.

Ядерный реактор 1 размещен в бетонной шахте 2. В подреакторном пространстве бетонной шахты расположена ловушка 3, внутри охлаждаемой оболочки 4 которой размещена стальная корзина 5 с брикетами жертвенного материала-разбавителя 6, заключенными в стальные обечайки 7. Охлаждаемая оболочка состоит из боковой стенки 8 и днища 9. Между реактором и ловушкой размещено направляющее устройство 10, стенки которого покрыты термостойким бетоном 11 с покрытием из легкоплавкого бетона 12. На дне корпуса реактора 1 размещены сегментированные брикеты 13, имеющие капиллярную структуру и удерживающие в каркасе тугоплавкие соединения тяжелых элементов. Дополнительно сегментированные брикеты 13 устанавливают также на направляющем устройстве 10 и в резервуаре 3. С целью защиты от механического воздействия расплава сегментированные брикеты 13 снабжены прочным козырьком 14.

Примером реализации изобретения служит способ локализации расплава активной

зоны ядерного реактора, описанный ниже.

В излагаемом примере осуществления изобретения в качестве резервуара применяется корзина, заполненная крупночешуйстыми жертвенными материалами, что позволяет охарактеризовать особенности реализации изобретения применительно к тигельным вариантам локализации расплава активной зоны.

Способ осуществляется следующим образом.

В процессе тяжелой аварии ядерного реактора 1, сопровождающейся плавлением и разрушением активной зоны, расплав перемещается в нижнюю часть корпуса

реактора и там накапливается и стратифицируется по плотности с выделением более тяжелой урансодержащей оксидной части кориума в нижней части и расположенным над ней слоем расплава стали. Распад накопленных в активной зоне радионуклидов происходит с выделением тепловой энергии, которая ведет к разогреву расплава.

После достижения определенных условий (температура, плотность теплового потока и др.) расплав разрушает корпус реактора и выходит в реакторную шахту 2.

Используя динамические свойства расплава в процессе его перемещения внутри и вне реакторного корпуса, проводят смешивание расплава с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны. Для наиболее эффективного смешивания расплав направляют в соприкосновение тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны таким образом, чтобы предотвратить образование корки (краста) на границе взаимодействия расплава с тяжелыми элементами и обеспечить возможно более полное растворение продуктов смешивания.

С этой целью в качестве тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, выбирают оксиды элементов из ряда гафний, тантал, европий, гадолиний, имеющие температуры плавления ( $\text{HfO}_2$  2790°C;  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  1785°C;  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  2322°C) выше температуры плавления стали (1500°C) и имеющие конгруэнтность с фрагментами и расплавом активной зоны. Важным фактором устойчивого

смешивания тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны с урансодержащей оксидной частью кориума является предотвращения всплытия тяжелых элементов в расплаве за счет архимедовых сил. Выбранные тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, имеют плотность, превышающую плотность стали:  $\text{HfO}_2$  9,68 кг/л;  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  8,53 кг/л;  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  7,41 кг/л;  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  7,42 кг/л. Сечения захвата тепловых нейтронов ( $\sigma_{n,\gamma}$ ) предложенных в изобретении тугоплавких соединений тяжелых элементов превышают 350 барн, что позволяет в тигельных вариантах локализации расплава активной зоны предотвратить повторную критичность при различных композициях расплава, претерпевающего как ликвацию в процессе длительного (1-1,5 года) остывания до твердого состояния так и образование различных уран-водных структур. В частности, известный булат-композит, получаемый путем дендритной ликвации углерода в стали.

Поддержание подкритического состояния расплава в резервуаре требует также предотвратить испарение тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны в процессе разогрева расплава. Предложенные материалы, как правило, имеют температуры кипения, превышающие испаряемость основных ядерноопасных компонентов расплава (оксидов плутония и урана). Температуры кипения:  $\text{HfO}_2$  4620°C;  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  3600°C выше температуры кипения расплава (ок. 3500°C).

Устройство работает следующим образом.

После начала тяжелой аварии, связанной с нарушением отвода тепла от активной зоны ядерного реактора 1, перегрев тепловыделяющих элементов, связанный с

распадом радионуклидов, приводит к тому, что оболочки тепловыделяющих элементов начинают нагреваться и взаимодействовать с водяным паром, заполняющим пространство реактора, с образованием водорода и разрушением тепловыделяющих элементов, обломки которых собираются в нижней части корпуса реактора 1 и образуют расплав, который стратифицируется по плотности с выделением более тяжелой урансодержащей оксидной части кориума в нижней части и расположенным над ней слоем расплава стали. За счет размещения на дне корпуса реактора 1 сегментированных брикетов 13, имеющих капиллярную структуру и удерживающих в каркасе тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, в процессе их смешивания и растворения в расплаве образуется композиция с пониженными размножающими свойствами. Капиллярность обеспечивает большую скорость взаимодействия и растворения. Дополнительно сегментированные брикеты 13 устанавливаются также на направляющем устройстве 10 и в резервуаре 3, что повышает возможность насыщения расплава поглотителями. Поскольку механическое воздействие расплава не должно препятствовать смешиванию его с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, тугоплавкие соединения тяжелых элементов удерживаются в каркасе сегментированных брикетов 13, закрепленном на конструктивных элементах реактора и шахты и препятствующем выносу поглотителей из зоны смешивания и растворения. С этой целью материал каркаса сегментированных брикетов 13 целесообразно выбирать из тугоплавких материалов, имеющих температуру плавления выше температуры расплава (2000-2600°C), например, из тантала ( $T_{пл}=2996^\circ\text{C}$ ), оксида циркония ( $T_{пл}=2687^\circ\text{C}$ ) и других механически прочных при сверхвысоких температурах материалов. Возможно также применение композитных материалов, а также материала с кристаллической структурой выращенных вискером тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны. Для предотвращения образования корки со стороны расплава на поверхности сегментированных брикетов 13 целесообразно каркас сегментированных брикетов, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, выполнить из материала с более высокой температурой плавления, чем тугоплавкие соединения тяжелых элементов, и выполнить его конструкцию из тонкостенных шайб, ориентированных вдоль опоры и образующих в сечении форму шестерни (фиг.2). С целью защиты от механического воздействия расплава сегментированные брикеты 13 снабжены прочным козырьком 14 (фиг.3).

Таким образом, данное изобретение позволит в случае тяжелых аварий ядерных реакторов с расплавлением активной зоны повысить надежность ловушек расплава за счет устранения опасности образования составов с повышенными характеристиками размножения нейтронов.

#### Формула изобретения

1. Способ локализации расплава активной зоны ядерного реактора, заключающийся в улавливании, выдерживании и охлаждении расплава в резервуаре, расположенном под реактором, причем процесс охлаждения расплава осуществляется путем теплосъема в атмосферу через защитный экран и при контакте расплава со стенками резервуара, охлаждение которых производят путем подачи к ним охлаждающей среды, отличающийся тем, что расплав перед выходом из реактора или в процессе заполнения резервуара смешивают с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве тугоплавких соединений тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, выбирают оксиды элементов из ряда гафний, тантал, европий, гадолиний.

5 3. Способ по п.1 или 2, отличающийся тем, что смешивание расплава с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов ведут с помощью растворения тяжелых элементов в расплаве.

4. Способ по п.1 или 2, отличающийся тем, что смешивание расплава с тугоплавкими соединениями тяжелых элементов ведут в нижней части корпуса  
10 реактора, на днище резервуара и элементах конструкции, направляющих поток расплава.

5. Устройство локализации расплава активной зоны ядерного реактора, включающее резервуар для улавливания и выдерживания расплава, расположенный  
15 под реактором и покрытый слоем материала, плавящегося при контакте с расплавом, систему охлаждения, отличающееся тем, что в тракте прохождения расплава, соединяющем активную зону реактора и резервуар, размещен по крайней мере один сегментированный брикет, имеющий капиллярную структуру и удерживающий в  
20 каркасе тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны.

6. Устройство по п.5, отличающееся тем, что каркас сегментированного брикета, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые  
нейтроны, имеет более высокую температуру плавления, чем тугоплавкие соединения  
25 тяжелых элементов, и выполнен из тонкого листа, ориентированного вертикально.

7. Устройство по п.5 или 6, отличающееся тем, что сегментированный брикет, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые  
нейтроны, защищен от механического воздействия расплава.

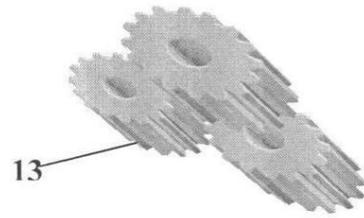
8. Устройство по п.5 или 6, отличающееся тем, что каркас сегментированного  
30 брикета, содержащий тугоплавкие соединения тяжелых элементов, поглощающих тепловые нейтроны, имеет в сечении форму шестерни.

35

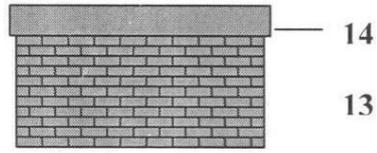
40

45

50



Фиг. 2



Фиг. 3