

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(11) 027036

(13) B9

(12) **ИСПРАВЛЕННОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К  
ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

- (15) Информация об исправлении  
Версия исправления: 2 (W2 B1)  
исправления в формуле  
Предшествующие публикации исправленных  
документов:  
B8, 31.01.2018, Бюллетень №1'2018 (W1)
- (51) Int. Cl. G21C 3/02 (2006.01)  
G21C 21/02 (2006.01)
- (48) Дата публикации исправления  
2023.04.05, Бюллетень №4'2023
- (45) Дата публикации и выдачи патента  
2017.06.30
- (21) Номер заявки  
201600108
- (22) Дата подачи заявки  
2015.12.25

(54) **ДИСПЕРСИОННЫЙ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ И СПОСОБ ЕГО  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

- (43) 2017.04.28
- (96) 2015000125 (RU) 2015.12.25
- (71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ  
ПРЕДПРИЯТИЕ "НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ НАУЧНО-  
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ  
ОБЪЕДИНЕНИЕ "ЛУЧ" (ФГУП  
"НИИ НПО "ЛУЧ") (RU)**
- Каретников Игорь Александрович,  
Колганов Александр Антонович,  
Мартыненко Анатолий Васильевич,  
Нужин Владимир Николаевич,  
Солдаткин Дмитрий Михайлович,  
Солнцев Владимир Анатольевич (RU)
- (56) RU-C2-2267175  
САМОЙЛОВ А.Г. и др. Дисперсионные  
ТВЭЛЫ. Том 1. Москва, Энергоатомиздат, 1982,  
с. 150-207  
RU-C1-2083015  
US-A1-4720370
- (72) Изобретатель:  
Дьяков Евгений Константинович,  
Жалилов Рафаэль Хайбуллович,

- (57) Изобретение относится к ядерной энергетике, в частности к тепловыделяющим элементам (ТВЭЛам) на основе дисперсионного ядерного топлива для исследовательских ядерных реакторов, в сердечнике которых топливо находится в виде частиц, равномерно распределенных в матрице из неделящегося материала. Дисперсионный тепловыделяющий элемент включает внешнюю оболочку и диффузионно связанный с ней топливный сердечник в виде металлической матрицы с размещёнными в ней топливными элементами с заданной объёмной долей топливной фазы  $V_f$  в сердечнике. Топливные элементы выполнены в виде равномерно распределённых в матрице волокон из металлического урана с эффективным диаметром

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{S \cdot V_f}{\pi N}}, \quad (1)$$

где S - площадь сердечника, N - количество волокон, и расстоянием между волокнами

$$d = D \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{V_f}} - 1 \right), \quad (2)$$

Каждое из волокон заключено в диффузионно связанную с ним оболочку из циркония или его сплавов, при этом оболочки соседних урановых элементов также диффузионно связаны между собой с образованием

Примечание: библиография отражает состояние при переиздании

B9

027036

027036

B9

матрицы, а расстояние между волокнами превышает удвоенное значение длины свободного пробега продуктов деления в матрице. Твэл изготавливают следующим образом. В оболочку из циркония или его сплавов заключают стержень из металлического урана с обеспечением заданной объемной доли топливной фазы в сердечнике и полученную заготовку выдавливают. Затем биметаллический прутки делят на несколько частей, полученные части объединяют в сборку и производят выдавливание сборки. Снова делят полученный многоволоконный прутки на несколько частей, объединяют в сборку и снова осуществляют выдавливание. Операции деления многоволоконного прутка на части и последующее выдавливание полученныхборок осуществляют до получения необходимого количества волокон  $N$ . Окончательную сборку заключают во внешнюю оболочку при сохранении объемной доли топливной фазы  $V_f$ , осуществляют выдавливание, а затем калибруют до получения эффективного диаметра  $D$  и заданной площади сердечника  $S$  в соответствии с соотношением (1).

027036 B9

027036 B9

## I. Область техники, к которой относится изобретение

Изобретение относится к ядерной энергетике, в частности к тепловыделяющим элементам (ТВЭЛам) на основе дисперсионного ядерного топлива для исследовательских ядерных реакторов, в сердечнике которых топливо находится в виде частиц, равномерно распределенных в матрице из неделящегося материала.

## II. Предшествующий уровень техники

Сердечники ТВЭЛов дисперсионного типа представляют собой топливные композиции ядерного топлива в виде частиц делящихся материалов (уран-233, уран-235, плутоний-239) или их соединений ( $UO_2$ ,  $U_3O_8$ , сплавы урана, интерметаллиды  $U(Al, Si)_3$  или  $UAl_3$ ), которые распределены в матрице из металлов, сплавов, керамики, графита и других неделящихся материалов или их сплавов и соединений.

Известно, что введенные МАГАТЭ ограничения на степень обогащения урана, применяемого в ядерных реакторах в мирных целях, заставляют привносить некоторые изменения в состав топливных композиций. При этом пластические свойства композиций изменяются в худшую сторону. Более жесткие свойства материала приводят к образованию ступков топливных частиц, нарушению пропорциональности размеров сердечника и защитных оболочек, к образованию трещин, что оказывает негативное влияние на равномерное распределение топливных частиц в сердечнике (Игнатъев П.П. Энергия - это сама жизнь. Новосибирск, НЗХК. 2013. - 87 с., с. 67).

Кроме того, использование интерметаллидов  $U(Al, Si)_3$  или  $UAl_3$  в дисперсионных ТВЭЛх для исследовательских реакторов ограничивается низким уровнем рабочих температур сердечника (не более  $300^\circ C$ ).

Таким образом, все упомянутые выше факторы налагают ряд технологических ограничений при изготовлении дисперсионных ТВЭЛов.

К дисперсионным ТВЭЛам предъявляются следующие основные требования: гарантированное отсутствие разгерметизации ТВЭЛа; необходимое соотношение топлива и конструкционных материалов (или объемная доля топливной фазы в ТВЭЛе, в сердечнике  $V_f$ ); совместимость топлива с матрицей; совместимость сердечника с оболочкой и оболочки с теплоносителем; развитая поверхность теплосъема; простота конструкции и технологии; равномерность распределения топлива; надежный тепловой контакт топлива с матрицей и матрицы с оболочкой, возможность съема необходимого количества тепла.

Основными операциями технологии изготовления ТВЭЛов дисперсионного типа независимо от выбранного метода являются изготовление сердечника, заключение его в оболочку, соединение сердечника с оболочкой и герметизация оболочки. При этом важно добиться надежного контакта сердечника с оболочкой для обеспечения максимального теплосъема во время работы ТВЭЛа (Самойлов А.Г. и др. Дисперсионные ТВЭЛы. Т.1. - М.: Энергоиздат, 1982, с. 150-208).

Известно несколько технологических схем изготовления ТВЭЛов дисперсионного типа, сводящихся к различным вариантам получения дисперсионного топливного сердечника, способа заключения его в оболочку и создания контакта (сцепления) сердечника с оболочкой (патент RU № 2086015, МПК G21C 21/02, опубл. 27.07.1997).

Сердечники изготавливаются методом плавки и литья, а также методом порошковой металлургии. Наиболее распространенными методами соединения сердечника с оболочкой являются метод прокатки, метод совместного выдавливания, метод волочения и метод зонного переплава материала матрицы при непрерывной подпитке зоны переплава составляющими дисперсионной композиции и вибрировании. При этом ТВЭЛу придаются размеры, близкие к конечным.

Основными недостатками указанных выше способов являются технологические сложности, связанные:

- с необходимостью отдельного изготовления сердечников с определенными механическими, физическими свойствами и геометрией; кроме того, в каждом методе изготовления сердечника имеются свои недостатки и трудности;

- с изменением первоначально заложенных в оболочку механических, физических и геометрических параметров оболочки после ее механического формоизменения;

- с негарантированным сцеплением оболочки с сердечником, в том числе и в способе зонного переплава материала матрицы при непрерывной подпитке зоны переплава составляющими дисперсионной композиции и вибрировании.

Известен способ изготовления ТВЭЛа дисперсионного типа (патент RU № 2374705, МПК G21C 21/02, опубл. 27.11.2009). В оболочку будущего ТВЭЛа, загерметизированного с одного конца, помещается соответствующая доля материала матрицы, например магния. Такую сборку в вертикальном положении нагревают до расплавления материала матрицы и на зеркало расплава непрерывно подают недостающую долю крупки делящегося материала, например оксида урана, при постоянном вибрировании. Вследствие разной плотности материала матрицы и крупки делящегося материала образуется дисперсионная композиция, которую охлаждают, а ТВЭЛ герметизируют.

Изготовленному таким способом ТВЭЛу присущи недостатки, а именно:

топливные частицы имеют различные размеры и форму и распределяются в сердечнике случайным

образом;

возможно смыкание поврежденных зон вокруг топливных частиц, что приводит к образованию теплового барьера между топливными частицами и оболочкой, поскольку поврежденные зоны имеют меньшую теплопроводность.

Существует новая технология изготовления ТВЭЛов дисперсионного типа, основанная на уникальных капиллярных свойствах новых сплавов и их способности проникать в любые зазоры под действием капиллярных сил - капиллярная пропитка, являющаяся разновидностью жидкофазного спекания.

Она включает в себя виброзасыпку смеси гранул топлива и матрицы в циркониевую оболочку ТВЭЛа и капиллярную пропитку - кратковременный (1-5 мин) отжиг при температуре 840-900°C (А. Savchenko, А. Vatulin, I. Kononov, А. Morozov, V. Orlov, O. Uferov et al., Dispersion type zirconium matrix fuels fabricated by capillary impregnation method, J. Nucl. Mater., 362 (2007), 356-363). При указанной температуре циркониевый сплав полностью расплавляется и под действием капиллярных сил перемещается и заполняет стыки между топливными гранулами, а также топливом и оболочкой, образуя металлургическое сцепление, что обеспечивает высокую теплопроводность топливного сердечника, однако, не исключает наличие пор.

После изготовления ТВЭЛа температура плавления матричного сплава увеличивается на 200-300°C, так как происходит изменение его состава за счет перехода в него циркония из оболочки ТВЭЛа и урана из топлива, что повышает надежность ТВЭЛа в аварийных ситуациях.

Однако ТВЭЛ, изготовленный таким способом, также не свободен от недостатков:

топливные частицы имеют различные размеры и форму и распределяются в сердечнике случайным образом;

возможно смыкание поврежденных зон вокруг топливных частиц.

Кроме того, наличие пор снижает теплопередачу от топливного элемента к оболочке, топливные частицы отличаются по размерам и расположены случайным образом, а наличие легирующих добавок в составе топливных частиц увеличивает захват тепловых нейтронов.

Известен ТВЭЛ, состоящий из герметичной оболочки и заглушки из тугоплавкого металла, например, нержавеющей стали типа X16H15M3, или циркониевого сплава, например Zr + 1% Nb, или хромоникелевого сплава (20-50% Cr), теплопроводной матрицы из беспористого заливочного сплава, например Al + 12% Si, или Al + 0,5% Ni, или Al + 0,5% Ni + 0,5% Zr + 0,25% Mo. В матрице размещены топливные гранулы из оксида урана (UO<sub>2</sub> или U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) с пористостью 4-22%, имеющие размер 200-3000 мкм, объемная доля которых составляет 61-70%. Сердечник ТВЭЛа имеет плотное металлургическое сцепление с оболочкой. Перечисленные факторы обеспечивают хорошую теплопроводность сердечника, низкий уровень рабочих температур сердечника (не более 500°C), сохранение геометрических характеристик ТВЭЛа в процессе длительной эксплуатации. Конструкция позволяет регулировать запас пористости в топливных гранулах сердечника, исключить распухание и сохранить геометрические характеристики ТВЭЛа в процессе эксплуатации (патент RU № 2154312, МПК G21C 3/20, G21C 21/02, опубл. 10.08.2000).

Недостатки известного ТВЭЛа состоят в том, что

топливные частицы имеют различные размеры и форму и распределяются в сердечнике случайным образом;

возможно смыкание поврежденных зон вокруг топливных частиц, снижающее теплопроводность ТВЭЛа, поскольку поврежденные зоны имеют меньшую теплопроводность.

наличие примесей в составе топливных частиц увеличивает захват тепловых нейтронов, что снижает эффективность ТВЭЛа.

Известен ТВЭЛ, в котором топливный сердечник состоит из делящейся фазы (частиц сплавов на основе соединений U(Al, Si)<sub>3</sub> или UAl<sub>3</sub>) в металлическом сплаве и фазы кремния кристаллического в количестве от 3 до 30% от объема активной части ТВЭЛа. Фаза кремния кристаллического введена в ТВЭЛ в виде частиц и/или в виде покрытия частиц делящейся фазы, и/или с металлическим сплавом на основе алюминия в виде отдельной фазы. Кроме частиц уран-алюминиевых сплавов и фазы кремния кристаллического топливный сердечник может содержать частицы разбавителя и/или выгорающего поглотителя. Металлургический контакт оболочки с топливным сердечником достигнут пропиткой пространства внутри оболочки, заполненного частицами компонентов топливного сердечника, сплавом на основе алюминия (патент RU № 2061264, МПК G21C 3/26, G21C 3/28, опубл. 27.05.1996).

Недостатком известного ТВЭЛа является то, что распределение топливных частиц, имеющих различные формы и размеры по сечениям сердечника, происходит случайно (хаотично), так как сердечник формируется путем смешения топливных частиц. Расстояние между топливными частицами также случайно и может быть меньше минимально допустимого размера вокруг топливных частиц, которое равно удвоенному значению среднего свободного пробега продуктов деления  $\lambda$ , образующего поврежденную зону в матрице. Не исключена возможность слипания топливных частиц, образование сгустков, а также смыкание поврежденных зон, где локализируются продукты деления, что приводит к снижению прочности матрицы, образованию теплового барьера, снижающего теплопередачу от топливных частиц к оболочке, к локальному повышению температуры (перегреву) и, в результате, к снижению ресурса работы ТВЭЛа.

Кроме того, в известной конструкции топливный элемент не обладает достаточной пластичностью, в частности из-за того, что кристаллический кремний вводят в топливный сердечник с металлическим сплавом на основе алюминия в виде отдельной фазы. В таком твэле имеется значительное количество хрупкого, плохо деформируемого интерметаллидного соединения типа  $UAl_3$ . Увеличение объемной доли этого соединения приводит к некачественному сцеплению топливного сердечника с оболочкой и, следовательно, к снижению надежности твэла.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому при использовании технического результату - прототипом к заявляемой группе изобретений является твэл, имеющий внутри оболочки твэла топливный сердечник из дисперсионной композиции урансодержащих частиц и сплава алюминия, в которой объемное содержание урансодержащих частиц составляет до 45%, размер урансодержащих частиц составляет от 63 до 315 мкм. Оболочка и сердечник имеют диффузионное сцепление между собой, полученное при изготовлении твэла методом совместного выдавливания через формирующую матрицу составной цилиндрической заготовки, состоящей из топливного сердечника, заглушек и оболочки (патент RU № 2267175, МПК G21C 3/32, G21C 3/02, опубл. 27.05.2005).

Недостатком этого твэла является то, что он имеет низкий уровень рабочих температур сердечника (не более 500°C). Кроме того, независимо от содержания объемной топливной фазы  $V_f$ , распределение топливных частиц, имеющих различные формы и размеры по сечениям сердечника, происходит случайно (хаотично), так как сердечник формируется путем смешения топливных частиц. При этом оценить расстояние между топливными частицами не представляется возможным. Это расстояние может быть меньше минимально допустимого размера, который равен удвоенному значению среднего свободного пробега продуктов деления  $A$  вокруг топливных частиц, образующих поврежденную зону в матрице. Соприкосновение топливных частиц, а также смыкание поврежденных зон, где локализуются продукты деления, приводит к снижению прочности матрицы, образованию теплового барьера, снижающего теплопередачу от топливных частиц к оболочке, что приводит к локальному повышению температуры (перегреву) и последующему разрушению твэла и, вследствие этого, к снижению ресурса работы твэла. В таком твэле имеется значительное количество хрупкого, плохо деформируемого интерметаллического соединения алюминия с ураном. Увеличение объемной доли этого соединения приводит к некачественному сцеплению топливного сердечника с оболочкой и, следовательно, к снижению надежности твэла.

### III. Сущность изобретения

Перед авторами стояла задача создания дисперсионного твэла с гарантированным равномерным распределением топлива в топливном сердечнике, обладающего технологичностью, высокой надежностью и длительным ресурсом работы.

Для решения поставленной задачи и достижения при использовании изобретения технического результата в дисперсионном тепловыделяющем элементе, включающем оболочку и диффузионно связанный с ней топливный сердечник в виде металлической матрицы с размещенными в ней топливными элементами с заданной объемной долей топливной фазы  $V_f$  в сердечнике, согласно изобретению топливные элементы выполнены в виде равномерно распределенных в матрице волокон из металлического урана с эффективным диаметром

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{S \times V_f}{\pi N}}, \quad (1)$$

где  $S$  - площадь сердечника,  $N$  - количество волокон, и расстоянием между волокнами

$$d = D \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{V_f}} - 1 \right), \quad (2)$$

каждое из которых заключено в диффузионно связанную с ним оболочку из циркония или его сплавов, при этом оболочки соседних урановых элементов также диффузионно связаны между собой с образованием матрицы, при этом расстояние между волокнами превышает удвоенное значение длины свободного пробега продуктов деления в матрице.

При эффективном диаметре не более 160 мкм сердечник включает от 49 до 343 топливных волокон, а в качестве материала топливного волокна выбран металлический уран в  $\beta$ -фазе и внешняя оболочка выполнена из циркония или его сплавов.

Изготовление дисперсионного тепловыделяющего элемента согласно заявляемому изобретению заключается в том, что в оболочку из циркония или его сплавов заключают стержень из металлического урана с обеспечением заданной объемной доли топливной фазы в сердечнике, полученную заготовку выдавливают, полученный таким образом биметаллический пруток делят на несколько частей, после чего полученные части объединяют в сборку, производят совместное выдавливание сборки, снова делят полученный многожильный пруток на несколько частей, объединяют в сборку и снова осуществляют выдавливание, при этом операции деления многоволоконного прутка на части и последующее совместное выдавливание полученныхборок осуществляют до получения необходимого количества волокон  $N$ , заключают окончательную сборку во внешнюю оболочку при сохранении объемной доли топливной фазы  $V_f$ , осуществляют совместное выдавливание, а затем калибруют до получения эффективного диаметра

ра  $D$  и заданной площади сердечника  $S$  в соответствии с соотношением (1).

Кроме того, сохранение объемной доли топливной фазы  $V_f$  обеспечивают при каждой операции объединения частей в сборку.

Уран применяют металлический в  $\beta$ -фазе, что позволяет получать топливные волокна минимального размера, благодаря его пластичной мелкозернистой рекристаллизованной структуре.

Выдавливание осуществляют с применением удаляемой оболочки из пластичного металла при температуре  $(450-630)^\circ\text{C}$ , а в процессе калибровки осуществляют термообработку для снятия наклепа.

Таким образом, получают достаточно ураноемкий твэл для исследовательских реакторов, содержание металлического урана в котором может меняться в широких пределах. Выбор в качестве материала оболочки и матрицы циркония и его сплавов обусловлен рабочими температурами  $600-700^\circ\text{C}$  и диффузионной связью всех составляющих конструкции твэла (топливных элементов с матрицей и матрицы с оболочкой). Диффузионную связь между всеми элементами твэла обеспечивает метод совместного выдавливания всех составляющих конструкции твэла, что в результате существенно повышает его теплопроводность за счет сохранения целостности матрицы из-за исключения возможности касания поврежденных зон вокруг волокон (по сравнению с топливными частицами). На повышение теплопроводности также оказывает влияние использование металлического урана.

Использование металлического урана позволяет также уменьшить захват тепловых нейтронов по сравнению с уран-молибденовым сплавом.

Поскольку металлический уран в  $\beta$ -фазе обладает высокой пластичностью и благодаря мелкозернистой рекристаллизованной структуре становится возможным изготавливать достаточно тонкие волокна (до  $10\ \mu\text{м}$  и менее), а также вследствие воздействия высокого давления и температуры для урана в  $\beta$ -фазе заметно снижается радиационное распухание (Ю.Н. Сокурский, Я.М. Стерлин, В.А. Федорченко. Уран и его сплавы. М., Атомиздат, 1971 г., с. 448, с. 301). Равномерное распределение волокон в твэле приводит к повышению допустимого выгорания в твэле почти в два раза и снижению отношения скорости выхода осколков деления к скорости их образования на несколько порядков. (Самойлов А.Г. и др. В 2-х томах. Т. 2. Конструкция и работоспособность. - М.: Энергоиздат, 1982. - 256 с, с. 156, 180).

#### IV. Перечень фигур чертежей и иных материалов

Сущность заявленной группы изобретений иллюстрируется фигурами графических изображений.

На фиг. 1 приведен внешний вид твэла.

На фиг. 2 показано поперечное сечение твэла.

На фиг. 3 представлено поперечное сечение сердечника твэла.

На фиг. 4 проиллюстрирован способ изготовления твэла с 343 волокнами, где

4а - схема получения биметаллического прутка;

4б - схема получения семиволоконного прутка;

4в - схема получения 49-волоконного прутка;

4г - схема получения 343-волоконного прутка;

4д - волочение 343-волоконного прутка;

4е - плющение 343-волоконного прутка;

4ж - скрутка 343-волоконного прутка и резка на твэлы;

4з - внешний вид твэлов.

На фиг. 5 проиллюстрирован способ изготовления твэла со 133 волокнами, где

5а - схема получения биметаллического прутка;

5б - схема получения семиволоконного прутка;

5в - схема получения 133-волоконного прутка;

5г - волочение 133-волоконного прутка;

5д - плющение 133-волоконного прутка;

5е - скрутка 133-волоконного прутка и резка на твэлы;

5ж - внешний вид твэлов.

На фиг. 6 представлено поперечное сечение (шлиф) твэла с 343 волокнами.

На фиг. 7 представлено поперечное сечение (шлиф) твэла с 133 волокнами.

На фиг. 8 приведен внешний вид твэлов.

Тепловыделяющий элемент, выполненный в соответствии с изобретением (см. фиг. 1), состоит из оболочки 1 (см. фиг. 2), в которой размещен диффузионно связанный с ней топливный сердечник 2, сечение которого показано на фиг. 3. Сердечник представляет собой волокна 3 из металлического урана, заключенные в оболочку 4 из пластичного металла (цирконий или его сплавы). При этом оболочки соседних топливных элементов диффузионно связаны между собой и таким образом формируют металлическую матрицу. Эффективный диаметр волокна  $D$  составляет

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{S \times V_f}{\pi N}}, \quad (1)$$

где  $S$  - площадь сердечника,  $N$  - число волокон,  $V_f$  - объемная доля топливной фазы.

При этом расстояние между волокнами составляет

$$d = D \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{V_f}} - 1 \right). \quad (2)$$

Урановые волокна распределены равномерно по сечению твэла. Их количество может составлять от 49 до 343, при этом эффективный диаметр волокон составляет от 10 до 160 мкм, а расстояние между ними составляет не менее 20 мкм, т.е. превышает удвоенное значение среднего свободного пробега продуктов деления в материале матрицы.

Изготовление такого твэла начинают с получения биметаллического прутка, для чего осуществляют совместное выдавливание через формирующую фильеру металлического урана в  $\beta$ -фазе с обогащением по требованию МАГАТЭ не более 20%, заключенного в герметичную оболочку из пластичного металла матрицы (цирконий или его сплавы) и затем из удаляемого металла (медь). Содержание урана определяют из необходимой объемной доли топливной фазы. При этом диаметр полученной заготовки уменьшают в 3-5 раз от начального. После операции выдавливания медную оболочку удаляют в растворе азотной кислоты.

Далее биметаллический пруток делят на несколько частей (отрезков). Часть из них, подобранных с учетом объемной доли топливной фазы, собирают по плотной упаковке в удаляемую оболочку (медь) и производят повторное выдавливание сборки. Получают многоволоконный пруток с количеством волокон равным числу уложенных в оболочку отрезков.

Затем полученный многоволоконный пруток делят на несколько частей, заключают часть из них (также подобранных с учетом объемной доли топливной фазы) в удаляемую оболочку (медь) по плотной упаковке и производят выдавливание сборки. При необходимости указанную операцию повторяют. В итоге получают многоволоконный пруток с многократно увеличенным количеством волокон (определяемым в соответствии с соотношением 1).

После чего, окончательную сборку из отрезков многоволоконного прутка (подобранных с учетом объемной доли топливной фазы) заключают также по плотной упаковке в неудаляемую герметичную оболочку (из циркония или его сплавов), которая будет внешней оболочкой твэла и в удаляемую пластичную оболочку (например, из меди) после чего производят окончательное выдавливание. Непосредственно перед каждой операцией выдавливания проводят термообработку и саму операцию выдавливания также проводят при температуре 450-630°C.

Затем производят калибровку путем волочения полученного прутка до нужного сечения твэла и эффективного диаметра волокон и последующую его разделку на части необходимой длины твэла. При этом перед каждой операцией волочения проводят термообработку в вакууме 450-630°C. В процессе волочения также последовательно уменьшается сечение заготовок.

Таким образом, получается твэл с равномерно распределенными топливными волокнами, диффузионно связанными с матрицей и оболочкой. Эффективный диаметр (1) и расстояние (2) между волокнами зависят от объемной доли топливной фазы. При постоянном объеме топливной фазы расстояние между волокнами зависит от эффективного диаметра волокон и должно превышать удвоенное значение длины свободного пробега продуктов деления в матрице, чтобы исключить возможность смыкания поврежденных зон соседних волокон.

Заявляемый дисперсионный твэл обладает гарантированно равномерным (упорядоченным) распределением топливных элементов в виде волокон по сечению твэла, позволяя уменьшить в 1,5 раза поврежденные зоны вокруг определенного из соотношения (1) количества волокон и исключить смыкание поврежденных зон вокруг топливных элементов.

Предложенная группа изобретений позволяет повысить надежность и ресурс работы твэла за счет упорядоченного распределения топливных элементов с эффективным диаметром  $D$  по сечению твэла. Подобное распределение топливных элементов обеспечивает исключение смыкания поврежденных зон вокруг топливных элементов в виде заранее определенного числа волокон  $N$  при определенном расстоянии между ними  $d$  при значительном (в 1,5 раза) уменьшении поврежденных зон вокруг волокон по сравнению с топливными частицами.

Одновременное формирование матрицы и волоконных топливных элементов в ней с обеспечением диффузионной связи всех элементов твэла, включая оболочку, позволяет упростить как конструкцию, так и изготовление твэла по сравнению с дисперсионными твэлами, изготавливаемыми с применением топливных частиц различной формы и размеров.

Разность модулей упругости урана в  $\beta$ -фазе и циркония при совместном выдавливании способствует сохранению целостности волокон урана в матрице и их геометрической формы.

Использование металлического урана позволяет менять объемную долю топливной фазы и ураноёмкость твэла в значительных пределах, которые могут достигать 0,8 и 14-15 гU/см<sup>3</sup> соответственно, что расширяет технологические возможности исследовательских реакторов. Изменяя значение объемной доли топливной фазы  $V_f$  возможно заранее оценивать расстояние между топливными волокнами, коррелируя их со средней длиной свободного пробега продуктов деления в матрице с учетом значений  $d$  и  $D$ .

Благодаря пластичности металлического урана  $\beta$ -фазы, имеется возможность изготавливать из него топливные волокна до 10 мкм и уменьшить захват тепловых нейтронов по сравнению со сплавами урана

и топливными композициями.

Вследствие воздействия давления и температуры (от 500 до 630°C) в процессе изготовления твэла уран в  $\beta$ -фазе приобретает радиационную стойкость, имеет низкий коэффициент радиационного роста даже при значительной степени выгорания.

Из-за малого диаметра волокна велика вероятность выхода осколков деления в материал матрицы, что уменьшает его распухание. Продукты деления, покинувшие тонкое урановое волокно, внедряются в кристаллическую решетку материала матрицы и в ней диффундируют (Ю.Н. Сокурский, Я.М. Стерлин, В.А. Федорченко. Уран и его сплавы. М., Атомиздат, 1971 г., с. 448, с. 315, с. 323). Использование в качестве матрицы материала циркония способствует удержанию продуктов деления, поскольку цирконий обладает свойствами геттера (Елинсон С.В., Петров К.И. Цирконий. Химические и физические методы анализа. - М.: Атомиздат, 1960. - 211 с., с. 10).

Благодаря увеличению теплопередачи от поверхности урановых волокон к матрице, от матрицы к оболочке и к теплоносителю за счет диффузионной связи всех элементов твэла, улучшается теплоотвод от урановых волокон сердечника, исключается их локальный перегрев и, следовательно, снижается их радиационный и термоциклический рост (Самойлов А.Г. и др. В 2-х томах, т. 2. Конструкция и работоспособность. - М: Энергоиздат, 1982. - 256 с, с. 122, Волкович В.А., Смирнов А.Л. Часть 3. Металлургия урана и технология его соединений. - Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. - 138 с., с. 132);

Разница коэффициентов термического расширения (КТР) урана и циркония способствует сохранению теплового контакта при переменных режимах работы реактора, поскольку КТР урана значительно больше КТР циркония.

#### **V. Сведения, подтверждающие возможность реализации изобретения**

Для изготовления твэла с заданным поперечным сечением 4 мм<sup>2</sup> (при этом площадь сердечника  $S=2$  мм<sup>2</sup>) и долей топливной фазы  $V_f$  (см. 1) из металлического урана в  $\beta$ -фазе (с обогащением до 20%) вначале изготавливают цилиндрическую заготовку (см. фиг. 4а), которую заключают в оболочку из сплава циркония Э110 с двумя торцевыми крышками, которые приваривают электронно-лучевой сваркой. При этом полученная сборка должна соответствовать заданному значению топливной фазы (например, по техническому требованию для исследовательского реактора ИВГ.1М). Полученную сборку заключают в удаляемую оболочку из пластичного металла, например, из меди, в результате чего получают первую сборку. Выдавливание первой сборки, нагретой до 630°C через нагретую до температуры 450°C пресс оснастку (фильеру или матрицу), производят на гидравлическом прессе типа ПА653.

После выдавливания через фильеру с полученного прутка удаляют медную оболочку в растворе азотной кислоты и получают биметаллический пруток, содержащий волокно урана, диффузионно связанное с окружающей его оболочкой из сплава Э110. Диаметр биметаллического прутка в 3-5 раз меньше относительно диаметра исходной первой сборки. Шлиф (поперечное сечение) прутка приведен в правой части фиг. 4а.

Биметаллический пруток делят части (отрезки). Из них отбирают сборку из 7 отрезков с соблюдением объемной доли топливной фазы, так как 7 отрезков плотно укладываются в цилиндрическую удаляемую оболочку из пластичного металла, например из меди (фиг. 4б). Полученную таким образом вторую сборку, также нагревают и также выдавливают через фильеру, после чего медную оболочку удаляют травлением в растворе азотной кислоты. Полученный многоволоконный пруток содержит уже семь урановых волокон, шлиф (поперечное сечение) которого приведен в правой части фиг. 4б.

Пруток снова делят на части и из них семь частей объединяют в сборку с соблюдением объемной доли топливной фазы, которую помещают в медную оболочку (см. фиг. 4в) и снова, как описано выше, выдавливают через фильеру, получая многоволоконный пруток, уже содержащий 49 урановых волокон, каждое из которых заключено в диффузионно связанную с ним оболочку из сплава циркония, при этом оболочки соседних урановых элементов также диффузионно связаны между собой с образованием матрицы. При этом, как следует из (1), эффективный диаметр волокна примерно составит 0,2-0,3 мм. Далее с прутка удаляют травлением медную оболочку, шлиф такого прутка приведен в правой части фиг. 4в, делят его на части и из них семь частей объединяют в сборку с соблюдением объемной доли топливной фазы.

Снова укладывают сборку в герметизируемую оболочку из сплава Э110, в медную оболочку и продавливают через фильеру (см. фиг. 4г). Затем медную оболочку удаляют. При этом полученный пруток содержит циркониевую оболочку, диффузионно связанную с сердечником, состоящем из 343 урановых волокон, каждое из которых заключено в диффузионно связанную с ним оболочку из сплава циркония, при этом оболочки соседних урановых элементов также диффузионно связаны между собой с образованием матрицы, при этом расстояние между волокнами больше удвоенного значения длины свободного пробега продуктов деления в матрице.

Как следует из соотношения (1) эффективный диаметр волокна примерно составит 0,1-0,15 мм. Чтобы достигнуть меньшего заданного сечения твэла ( $S=4$  мм<sup>2</sup>) производят дополнительные операции калибровки волочением (см. фиг. 4д), например, до диаметра 2,3 мм, с промежуточными термообработ-

ками. Из соотношения (1) эффективный диаметр (размер) волокна примерно составит 0,025-0,03 мм. Следующая операция плющения (см. фиг. 4е) до размеров 2,8×1,5 мм для дальнейшего скручивания (см. фиг. 4ж) с шагом, например, 30 мм. В процессе плющения оболочка и сердечник деформируются, сохраняя эффективный диаметр волокна  $D$  и среднее расстояние между ними  $d$ . Операции плющения и скрутки придают форму твэлу, которая обеспечивает эффективный теплосъем с поверхности твэла и возможность упаковки твэлов в ТВС (тепловыделяющую сборку). Далее полученную заготовку длиной 15-20 м делят на твэлы (см. фиг. 4з) нужной длины, например длиной 800 мм. Шлиф твэла приведен в правой части фиг. 4е.

При изготовлении твэла, например, содержащего 133 урановых волокна (см. фиг. 5), после получения семиволоконных отрезков (см. фиг. 5б) их формируют в сборки по 19 штук с соблюдением объемной доли топливной фазы, которые заключают в герметизируемую циркониевую (сплав Э110) и медную оболочку (см. фиг. 5в) и снова продавливают через фильеру. Дальнейшие операции травления медной оболочкой и калибровки производятся аналогично предыдущему варианту изготовления, что представлено на фиг. 5. В правой части фиг. 5 приведены шлифы (поперечные сечения) прутков и твэла.

На фиг. 6 приведено поперечное сечение твэла с 343 волокнами. При значении  $S=2 \text{ мм}^2$  и  $V_f=20\%$  эффективный диаметр волокна  $D$  составляет порядка 40 мкм в соответствии с (1) при  $N=343$ , а расстояние (2) между волокнами - порядка 45 мкм.

На фиг. 7 приведено поперечное сечение твэла с 133 волокнами. При значении  $S=2 \text{ мм}^2$  и  $V_f=15\%$  эффективный диаметр волокна  $D$  составит в соответствии с (1) порядка 50 мкм при расстоянии (2) между волокнами порядка 85 мкм и количестве волокон  $N=133$ .

Из фиг. 6 и 7 видно, что число волокон, их эффективный диаметр, площадь сечения сердечника соответствуют соотношению (1). Расстояние между волокнами удовлетворяют соотношению (2) и превышает удвоенное значение длины свободного пробега продуктов деления в матрице из сплава Э110 (18,2 мкм).

Масса урана ( $V_f$ ) и его равномерность распределения по длине твэла проверялась на установке гамма-спектрометрического контроля "Пост контроля урана ПНК СУТ-2".

На фиг. 8 представлен внешний вид партии твэлов, которые укладываются в ТВС.

Заявленная группа изобретений позволила получить высокотемпературный дисперсионный твэл с гарантированно равномерным расположением топливных элементов в виде волокон по сечению твэла с заранее выбранным эффективным диаметром и расстоянием между волокнами. Благодаря указанному техническому результату полученный твэл обладает высокой надежностью, более длительным ресурсом работы и обеспечивает расширение технологических возможностей по модернизации существующих исследовательских реакторов с твэлами с повышенной концентрацией урана в сердечнике и с обогащением по  $^{235}\text{U}$  до 20%.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Дисперсионный тепловыделяющий элемент, включающий внешнюю оболочку и диффузионно связанный с ней топливный сердечник в виде металлической матрицы с размещенными в ней топливными элементами с заданной объемной долей топливной фазы  $V_f$  в сердечнике, отличающийся тем, что топливные элементы выполнены в виде равномерно распределенных в матрице волокон из металлического урана с эффективным диаметром

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{S \cdot V_f}{\pi N}}, \quad (1)$$

где  $S$  - площадь сердечника,  $N$  - количество волокон, и расстоянием между волокнами

$$d = D \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{V_f}} - 1 \right), \quad (2)$$

каждое из которых заключено в диффузионно связанную с ним оболочку из циркония или его сплавов, при этом оболочки соседних урановых элементов также диффузионно связаны между собой с образованием матрицы, а расстояние между волокнами превышает удвоенное значение длины свободного пробега продуктов деления в матрице.

2. Дисперсионный тепловыделяющий элемент по п.1, отличающийся тем, что при эффективном диаметре не более 160 мкм сердечник включает от 49 до 343 топливных волокон.

3. Дисперсионный тепловыделяющий элемент по п.1, отличающийся тем, что в качестве материала топливного волокна выбран металлический уран в  $\beta$ -фазе.

4. Дисперсионный тепловыделяющий элемент по п.1, отличающийся тем, что внешняя оболочка выполнена из циркония или его сплавов.

5. Способ изготовления дисперсионного тепловыделяющего элемента по п.1, заключающийся в том, что в оболочку из циркония или его сплавов заключают стержень из металлического урана с обеспечением заданной объемной доли топливной фазы в сердечнике, полученную заготовку выдавливают,

полученный таким образом биметаллический пруток делят на несколько частей, после чего полученные части объединяют в сборку, производят выдавливание сборки, снова делят полученный многоволоконный пруток на несколько частей, объединяют в сборку и снова осуществляют выдавливание, при этом операции деления многоволоконного прутка на части и последующее выдавливание полученныхборок осуществляют до получения необходимого количества волокон  $N$ , заключают окончательную сборку во внешнюю оболочку при сохранении объемной доли топливной фазы  $V_f$ , осуществляют выдавливание, а затем калибруют до получения эффективного диаметра  $D$  и заданной площади сердечника  $S$  в соответствии с соотношением (1).

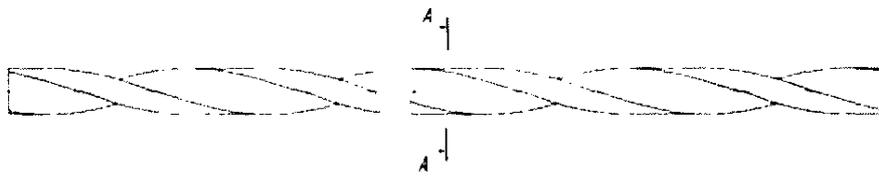
6. Способ по п.5, отличающийся тем, что сохранение объемной доли топливной фазы  $V_f$  обеспечивают при каждой операции объединения частей в сборку.

7. Способ по п.5, отличающийся тем, что применяют металлический уран в  $\beta$ -фазе.

8. Способ по п.5, отличающийся тем, что выдавливание осуществляют с применением удаляемой оболочки из пластичного металла.

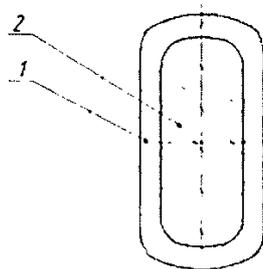
9. Способ по п.5, отличающийся тем, что выдавливание проводят при температуре 450-630°C.

10. Способ по п.5, отличающийся тем, что в процессе калибровки осуществляют термообработку.

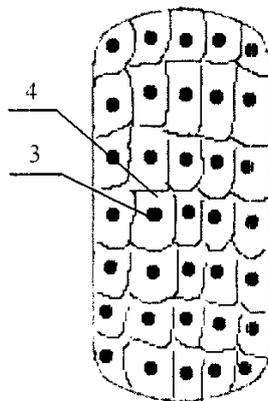


Фиг. 1

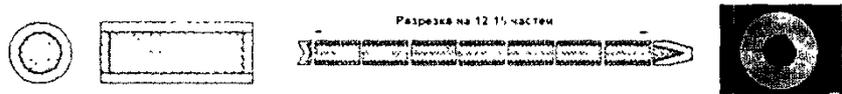
A-A



Фиг. 2



Фиг. 3



4а



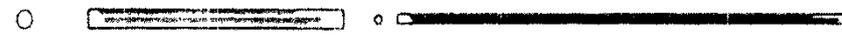
4б



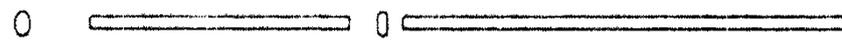
4в



4г



4д



4е

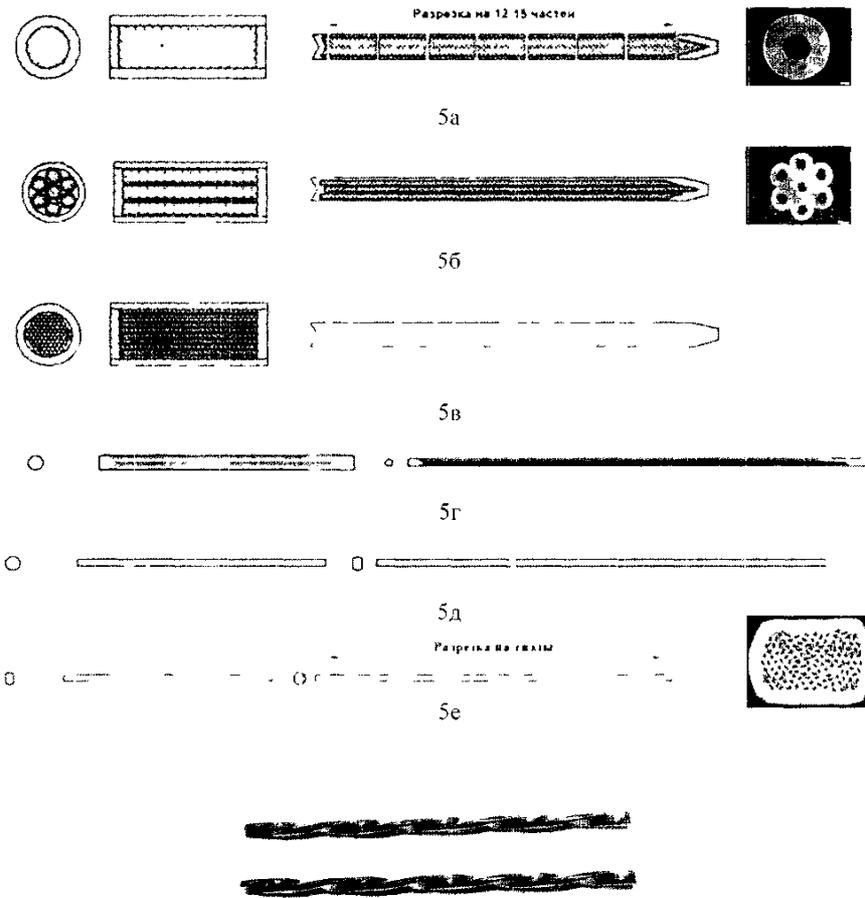


4ж

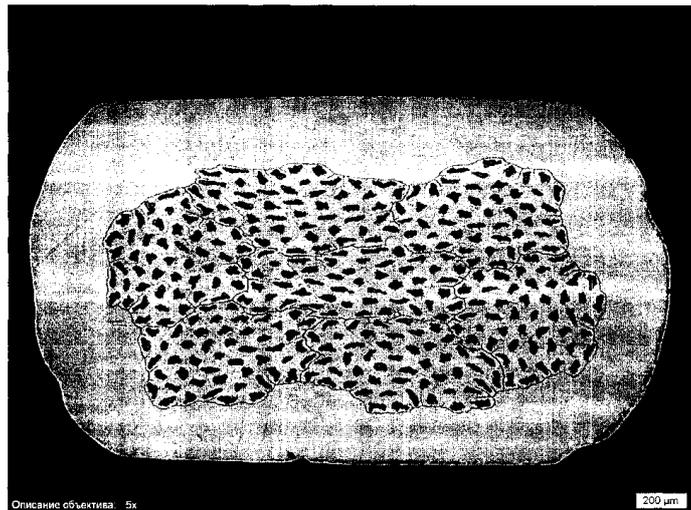


4з

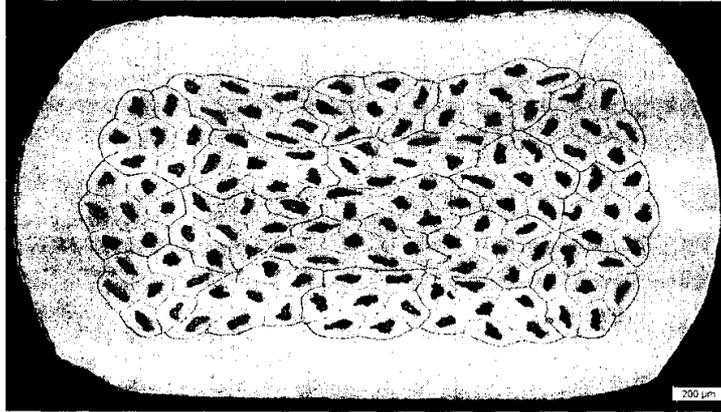
Фиг. 4



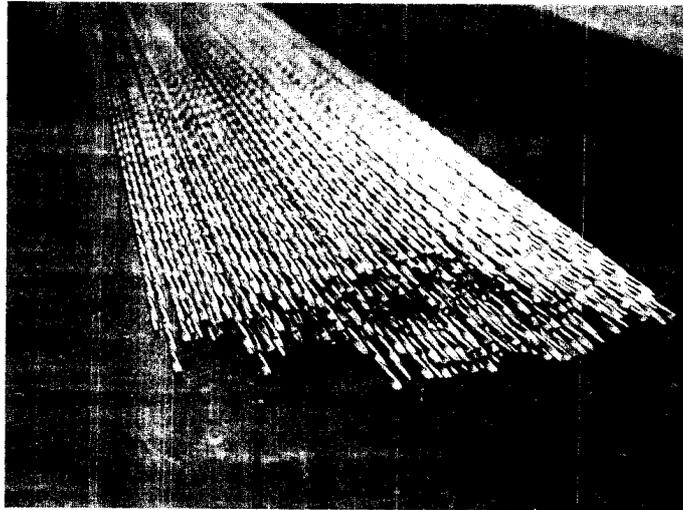
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8