



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 198 438** ⁽¹³⁾ **C2**
(51) МПК⁷ **G 21 C 3/02, 21/02, H 01 J 45/00**

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21), (22) Заявка: 2001111731/06, 28.04.2001
(24) Дата начала действия патента: 28.04.2001
(46) Дата публикации: 10.02.2003
(56) Ссылки: RU 2086033 C1, 27.07.1997. RU 2069918 C1, 27.11.1996. RU 2131630 C1, 10.06.1999. RU 2133518 C1, 20.07.1999. RU 2095882 C1, 10.11.1997. US 3673440 A, 27.06.1972.
(98) Адрес для переписки:
141070, Московская обл., г.Королев,
ул.Ленина, 4а, ОАО РКК "Энергия" им.
С.П.Королева, отдел промышленной
собственности и инноватики

(71) Заявитель:
Открытое акционерное общество
"Ракетно-космическая корпорация "Энергия"
им. С.П.Королева"
(72) Изобретатель: Корнилов В.А.
(73) Патентообладатель:
Открытое акционерное общество
"Ракетно-космическая корпорация "Энергия"
им. С.П.Королева"

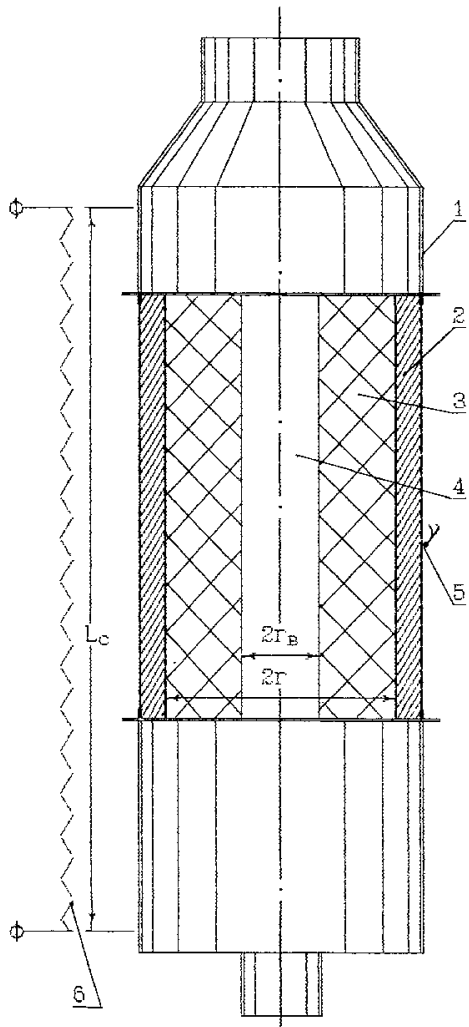
(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВЫНОСА ТОПЛИВНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ВЕНТИЛИРУЕМОГО ТВЭЛА

(57)
Изобретение относится к разработке вентилируемых твэлов, их экспериментальной отработке в ядерных реакторах, в частности термоэмиссионных твэлов, при создании электрогенерирующих каналов термоэмиссионного реактора-преобразователя. В процессе реакторных испытаний вентилируемого твэла в момент времени τ измеряют тепловую мощность, фиксируют давление газообразных продуктов деления в системе вентиляции, температуру оболочки твэла и оценивают скорость выноса топливного материала по предлагаемому выражению. Технический результат - повышение точности в определении скорости выноса топлива и упрощение эксперимента. 4 ил.

RU 2 198 438 C2

RU 2 198 438 C2

RU 2198438 C2



Фиг. 1

RU 2198438 C2



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 198 438** ⁽¹³⁾ **C2**
(51) Int. Cl.⁷ **G 21 C 3/02, 21/02, H 01 J**
45/00

RUSSIAN AGENCY
FOR PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: 2001111731/06, 28.04.2001

(24) Effective date for property rights: 28.04.2001

(46) Date of publication: 10.02.2003

(98) Mail address:
141070, Moskovskaja obl., g.Korolev,
ul.Lenina, 4a, OAO RKK "Ehnergija" im.
S.P.Koroleva, otdel promyshlennoj
sobstvennosti i innovatiki

(71) Applicant:
Otkrytoe aktsionernoje obshchestvo
"Raketno-kosmicheskaja korporatsija
"Ehnergija" im. S.P.Koroleva"

(72) Inventor: Kornilov V.A.

(73) Proprietor:
Otkrytoe aktsionernoje obshchestvo
"Raketno-kosmicheskaja korporatsija
"Ehnergija" im. S.P.Koroleva"

(54) **METHOD FOR DETERMINING SPEED OF FUEL MATERIAL ESCAPE FROM VENTILATED FUEL ELEMENT**

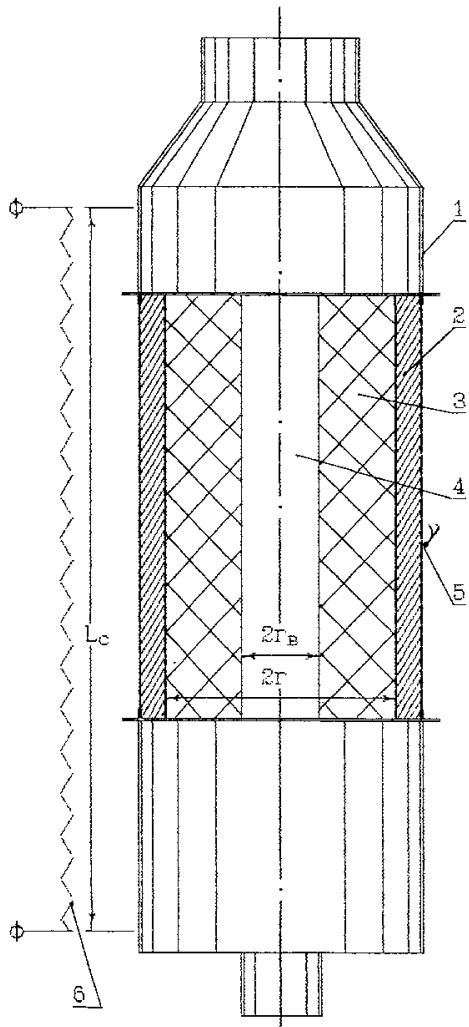
(57) Abstract:

FIELD: ventilated fuel elements for thermionic converter reactors. SUBSTANCE: in the course of experimental run of ventilated thermionic fuel element used for power-generating channels thermal power is measured at time moment τ , pressure of gaseous fission products in ventilation system and fuel- element can temperature are recorded, and speed of fuel material escape is evaluated from expression given in description of invention. EFFECT: enhanced precision, simplified experiment. 4 dwg

RU 2 1 9 8 4 3 8 C 2

RU 2 1 9 8 4 3 8 C 2

RU 2198438 C2



Фиг. 1

RU 2198438 C2

Изобретение относится к разработке вентилируемых твэлов, их экспериментальной отработке в ядерных реакторах, в частности к термоэмиссионному методу преобразования тепловой энергии в электрическую и реакторной теплофизике и может быть использовано в программе создания термоэмиссионных твэлов энергонапряженных электрогенерирующих каналов (ЭГК), образующих активную зону термоэмиссионного реактора-преобразователя (ТРП).

Одним из факторов, определяющих ресурс вентилируемого твэла, является вынос топливного материала (ТМ) через систему вентиляции газообразных продуктов деления (ГПД) с последующей конденсацией ТМ на "холодных" участках газоотводного тракта. Неконтролируемый вынос ТМ из твэлов может приводить к перекрытию каналов вывода ГПД, их закупорке, что в свою очередь ведет к интенсивной деформации оболочки твэла. Особенно важен контроль выноса ТМ из высокотемпературных термо-эмиссионных твэлов в составе ЭГК. Конденсация ТМ на конструктивных элементах межтвэльного пространства в ЭГК приводит к появлению утечек тока, снижению мощности и КПД, т.е. возникновению отказа типа "деградация характеристик". Поэтому определение скорости выноса ТМ через систему вентиляции, а следовательно и ресурса работы по этому процессу, является важнейшей задачей при создании энергонапряженных твэлов.

Известен способ определения скорости выноса ТМ из вентилируемого твэла, использующий уравнение Пуазейля для потока Q течения газа через канал в виде трубы круглого сечения, описывающее вязкостное течение [1].

$$Q = \pi \cdot a^4 \cdot P_a \cdot (P_2 - P_1) / (8 \cdot \eta \cdot l), \quad (1)$$

где a - радиус трубы; l - ее длина; η - вязкость газа; P_2 и P_1 - давления, измеренные у входа в канал и у выхода из канала соответственно; P_a - среднее арифметическое из P_1 и P_2 .

Недостаток данного метода заключается в необходимости измерения давлений пара ТМ у входа в канал и выхода из канала, через который осуществляется вывод ГПД из вентилируемого твэла. Осуществить измерение этих давлений в реакторных условиях, с учетом резкой зависимости давления паров ТМ от температуры, очень сложно.

Наиболее близким к изобретению по технической сущности является способ определения скорости выноса ТМ из вентилируемого твэла, включающий в процессе реакторных испытаний твэла измерение тепловой мощности и оценку скорости выноса ТМ (оксидного топлива) через систему вентиляции топливно-эмиттерного узла термоэмиссионного ЭГК, приведенное в [2]. Способ заключается в измерении зависимости от времени тепловыделения (Q) в топливно-эмиттерном узле и тепловыделения (q) конденсата топлива, вышедшего через систему вентиляции и сконденсировавшегося вне топливно-эмиттерного узла, по этим зависимостям оценивают для момента

времени τ_i скорость изменения тепловыделения в ТЭУ $dQ/d\tau$ и в конденсате топлива $dq/d\tau$, а скорость выноса топлива m_i через систему вентиляции в момент времени τ_i оценивают по выражению

$$m_i = \frac{M_0}{(q_i + Q_i)} \cdot Z \cdot \left(\frac{dq}{d\tau} \cdot Q_i - \frac{dQ}{d\tau} \cdot q_i \right), \quad (2)$$

где M_0 - начальная масса топлива в топливно-эмиттерном узле; Q_i - тепловыделение в ТЭУ в момент времени $\tau = \tau_i$; q_i - тепловыделение конденсата топлива, вышедшего из ТЭУ через систему вентиляции в момент времени $\tau = \tau_i$.

Недостатком данного способа является необходимость постоянного, в процессе эксперимента, измерения тепловыделения q в конденсате ТМ, что достаточно сложно по следующим причинам:

1) кроме основного датчика тепловой мощности для измерения Q тепловыделения в твэле, при измерении тепловыделения в конденсате ТМ, вышедшего за пределы твэла, q требуется дополнительная система очень чувствительных датчиков, т.к. количество вышедшего ТМ может быть очень малым, т.е. ниже порога чувствительности этих датчиков;

2) погрешность в измерении q обусловлена также тем, что ТМ, вышедший из твэла, конденсируется в системе вентиляции не компактно, а распределяется по конструкциям внутри системы вентиляции, что может приводить к взаимным помехам в показаниях датчиков для измерения q и Q ;

3) чтобы избежать помех в показаниях датчиков q и Q в конструкции системы вентиляции должны быть предусмотрены специальные "холодные" ловушки для улавливания конденсата ТМ, что приводит к усложнению конструкции системы вентиляции;

4) процесс измерения q и Q должен проходить непрерывно во времени, что требует внедрения дополнительной системы регистрации, усложняющей эксперимент.

Кроме того, недостатком этого метода можно считать и то, что регистрация скорости выноса ТМ из твэла производится не в интересующий нас момент времени τ_i , а только по прошествии некоторого времени, после получения зависимости $Q(\tau)$ и $q(\tau)$.

Техническим результатом, достигаемым при использовании изобретения, является повышение точности в определении скорости выноса топлива, упрощение эксперимента.

Указанный технический результат достигается предложенным способом определения скорости выноса топливного материала из вентилируемого твэла, включающий в процессе реакторных испытаний твэла измерение тепловой мощности и оценку скорости выноса топливного материала, первоначально измеряют время переконденсации топливного материала τ_k , затем в момент времени $\tau + \tau_k$ измеряют тепловую мощность, фиксируют давление (P) газообразных продуктов деления в системе вентиляции, температуру ($T_{об}$) оболочки твэла и оценивают скорость, выноса (J) топливного

материала по выражению

$$J = \frac{A \cdot (q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \varepsilon \cdot \ln \varepsilon / (1 - \varepsilon)) + T_{об})^{1/2}}{P \cdot \sum R \cdot \exp(B / (q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \varepsilon \cdot \ln \varepsilon / (1 - \varepsilon)) + T_{об}))} \quad (3)$$

где q_f - плотность тепловой мощности, поступающей на оболочку твэла из топливного материала в момент времени $\tau + \tau_k$, Вт/м²;

r - внутренний радиус оболочки твэла, м;

λ - коэффициент теплопроводности топливного материала, Вт/(м·град);

ε - относительная объемная доля пористости топливного материала, отн.ед. ;

$\sum R$ - суммарное сопротивление системы вентиляции, 1/м;

A и B - коэффициенты, зависящие от вида топливного материала; A

[кг²/(м²·с³·град^{1/2})]; B [град], τ_k [с]; τ [с]; J [кг/с]; P [Па]; $T_{об}$ [К].

Согласно формуле изобретения, для определения J по выражению (3) необходимо измерять время переконденсации ТМ τ_k . При изготовлении твэлов ядерное горючее закладывается в виде топливных таблеток, образующих топливный блок с зазором между ТМ и внутренней поверхностью оболочки твэла, что создает большое термическое сопротивление тепловому потоку, идущему от ТМ к оболочке твэла, и таким образом приводит к существенному скачку температуры в ТМ. Тем самым активизируется процесс переконденсации ТМ на оболочку твэла и уплотнение его с образованием центральной газовой полости. Время переконденсации ТМ можно фиксировать с помощью показаний каких-либо устройств (например, термопар на оболочке твэла или на несущей трубке ЭГК). Причем, важна не величина, скажем показаний термопар, а временная динамика в показании устройства. Поясним этот момент. При испытаниях твэлов, в частности термоэмиссионных твэлов в составе ЭГК, в исследовательских реакторах был отмечен факт изменения теплового потока из твэла (при неизменной мощности исследовательского реактора), в частности это отмечается показаниями термопар на несущей трубке ЭГК, что связано с процессом переконденсации ТМ. Кривая изменения плотности тепловой мощности q_f в начале растет, а затем плавно переходит в стационарное состояние с постоянным показанием величины q_f . Интервал времени до выхода кривой на постоянную величину τ_k связан с завершением процесса переконденсации ТМ, причем для высокотемпературных твэлов этот интервал времени может быть очень малым [3]. С завершением процесса переконденсации ТМ перераспределяется по внутренней поверхности оболочки твэла с образованием изотермической центральной газовой полости [4]. Факт контакта ТМ с внутренней поверхностью оболочки твэла позволяет предположить равенство температуры оболочки твэла и ТМ в месте их контакта, что использовано при выводе выражения (3).

На фиг.1-3 схематично представлены основные конструкционные варианты общих видов вентилируемых твэлов, в которых

может быть реализован данный способ. На фиг.4 схематично изображен ядерный реактор, где обрабатывается вентилируемый твэл.

На фиг. 1-3 обозначено: 1 - твэл, 2 - оболочка, 3 - топливный материал (ТМ), 4 - система вентиляции, 5 - датчик температуры, 6 - датчик тепловой мощности, 7 - трубка, 8 - капиллярный наконечник. На фиг.1 система вентиляции 4 выполнена в виде центрального канала пронизывающего ТМ на всю длину твэла. На фиг.2 и 3 система вентиляции 4 состоит из центральной осесимметричной трубки 7 с капиллярным наконечником 8. На фиг.4 обозначено: 9 - датчик давления, 10 - ячейка реактора, 11 - активная зона, 12 - ядерный реактор, 13 - резервуар-отстойник ГПД.

Способ реализуется следующим образом.

Твэл 1 с устройствами регистрации (датчиком тепловой мощности 6 и датчиком температуры 5 оболочки 2 твэла 1) помещают в ячейку 10 активной зоны 11 ядерного реактора 12. В процессе работы реактора 12 в вентилируемом твэле 1 происходит деление ядерного горючего в ТМ 3 с образованием газообразных продуктов деления, выходящих через систему вентиляции 4 за пределы твэла 1 и реактора 12 в резервуар-отстойник ГПД 13. В процессе выделения тепловой мощности в ТМ 3 происходит его нагрев и переконденсация ТМ 3 на более холодную внутреннюю поверхность оболочки 2 твэла 1. Факт окончания процесса переконденсации ТМ 3 определяют по динамике показаний устройства регистрации, например с помощью показаний термопар 5, фиксируя таким образом время τ_k переконденсации ТМ 3. Одновременно с ГПД через систему вентиляции 4, а именно или через центральный канал (фиг.1) или через капиллярный наконечник 8 и осесимметричную трубку 7 (фиг.2), выходят и молекулы ТМ 3, диффундирующие в парогазовой среде, состоящей из ГПД и ТМ. В интересующий нас момент времени $\tau + \tau_k$ регистрируют датчиком тепловой мощности 5, в качестве которого может быть использован секционированный калориметр интегрального теплового потока [5], плотность тепловой мощности q_f , поступающей на оболочку 2 твэла 1 из ТМ 3. С помощью датчика давления 9, установленного на выходе ГПД из системы вентиляции, фиксируем давление P . Датчиком температуры 5, например термопарой, фиксируем температуру $T_{об}$ оболочки 2 твэла 1. Зная геометрические характеристики вентилируемого твэла 1, относительную, объемную долю пористости ТМ 3 и физические характеристики используемого топливного материала 3, с помощью выражения (3) оцениваем скорость выноса J ТМ 3.

Приведем вывод выражения (3), используя явление диффузии молекул ТМ в одномерном случае в двухкомпонентной системе (ГПД и пары ТМ), описываемое первым законом Фика [6]. Предполагается, что система вентиляции твэла выполнена так, что не допускает конденсации молекул ТМ внутри нее или эта конденсация пренебрежимо мала и не влияет на работоспособность системы вентиляции.

В этом случае первый закон Фика можно записать в виде:

$$J = -D \cdot \mu \cdot (\rho_{\text{вых}} - \rho_0) / \Sigma R, \quad (4)$$

где J - скорость выноса ТМ, вышедшего из вентилируемого твэла; D - коэффициент диффузии молекул ТМ в парогазовой смеси ГПД и молекул ТМ; μ - молекулярная масса ТМ; $\rho_{\text{вых}}$ - концентрация ТМ на выходе из системы вентиляции твэла; ρ_0 - максимальная концентрация молекул ТМ в твэле; ΣR - суммарное сопротивление системы вентиляции.

В случае выполнения системы вентиляции в виде осесимметричного канала в ТМ, как показано на фиг.1, в первом приближении можно считать

$$\Sigma R = L_c / (2\pi \cdot r_B^2) \quad (5)$$

В случае выполнения системы вентиляции в виде центральной осесимметричной трубки с капиллярным наконечником (фиг.2, 3)

$$\Sigma R = l_1 / (\pi \cdot r_1^2) + l_2 / (\pi \cdot r_2^2) \quad (6)$$

В первом приближении коэффициент диффузии D молекул ТМ для неравновесной стационарной парогазовой смеси молекул ТМ и ГПД (в основном молекул Хе [7]) вычисляется по формуле [8]

$$D = u \cdot \lambda^* / 3, \quad (7)$$

где u - средняя скорость теплового движения молекул ТМ;

λ^* - средняя длина свободного пробега молекул ТМ.

Скорость u определим из выражения, приведенного в [9], а λ^* - из выражения, приведенного в [10], считая, что ГПД состоит в основном из Хе, как следует из [7]

$$u = (8 \cdot k \cdot T / (\pi \cdot \mu))^{1/2}, \quad (8)$$

$$\lambda^* = k \cdot T / (\pi \cdot ((d + d_{\text{Хе}}) / 2)^2 \cdot (1 + \mu / \mu_{\text{Хе}})^{1/2} \cdot P), \quad (9)$$

где k - постоянная Больцмана; T - температура; d, $d_{\text{Хе}}$ - диаметры молекул ТМ и Хе соответственно; $\mu, \mu_{\text{Хе}}$ - молекулярные массы молекул ТМ и Хе соответственно; P - давление ГПД.

Зная плотность ТМ ρ , определить d можно из соотношения $d = 1,122 \cdot (\mu / \rho)^{1/3}$ [15], а $d_{\text{Хе}}$ из [16].

Учитывая экспоненциальную зависимость давления пара $P_{\text{ТМ}}$ от температуры T для широкого класса ТМ [12, 13], можно записать

$$P_{\text{ТМ}} = A^* \cdot \exp(-B/T), \quad (10)$$

где A^* и B - коэффициенты, зависящие от вида ТМ.

Откуда выражение для максимальной концентрации ТМ в твэле, с учетом соотношения $P = nkT$ из [11], можно записать в виде

$$\rho_0 = A^* \cdot \exp(-B/T) / (k \cdot T). \quad (11)$$

Учитывая, что температура конструкции, на которой происходит конденсация ТМ, вышедшего из твэла, намного меньше максимальной температуры ТМ в твэле, и с учетом (11) - экспоненциальной зависимости концентрации молекул ТМ от температуры

$$\rho_0 > \rho_{\text{вых}} \quad (12)$$

Учитывая вышесказанное, подставляем в (4) выражения (7) и (11), с учетом (8), (9), (12)

$$J = A \cdot T^{1/2} \cdot \exp(-B/T) / (P \cdot \Sigma R), \quad (13)$$

где коэффициент A зависит от вида ТМ и определяется из выражения

$$A = \frac{A^* \cdot (8 \cdot k \cdot \mu / \pi)^{1/2}}{3 \cdot \pi \cdot ((d + d_{\text{Хе}}) / 2)^2 \cdot (1 + \mu / \mu_{\text{Хе}})^{1/2}} \quad (14)$$

Температуру T для выражения (13), соответствующую максимальной температуре ТМ в твэле, определим по зависимости, приведенной в [14] для полого топливного цилиндра с источниками тепла, охлаждаемого с наружной поверхности.

$$T = q_v \cdot r^2 \cdot ((r_B^2 - r^2) / r^2 + (r_B / r)^2 \cdot \ln(r_B / r)^2 / (4 \cdot \lambda)) + T_{\text{об}} \quad (15)$$

где q_v - плотность объемного тепловыделения в ТМ твэла; r и r_B - соответственно радиусы наружной и внутренней поверхностей полого топливного цилиндра; λ - теплопроводность ТМ; $T_{\text{об}}$ - температура на наружной поверхности топливного цилиндра, равная температуре оболочки твэла.

После процесса переконденсации и уплотнения ТМ в твэле, с достаточной степенью точности, можно считать, что относительная объемная доля пористости топливного материала (свободный объем не занятый ТМ в твэле)

$$\varepsilon = (r_B / r)^2 \quad (16)$$

Выразим

$$q_v = q_f \cdot 2\pi \cdot r \cdot L_c / (\pi \cdot r^2 \cdot L_c \cdot (1 - \varepsilon)) = 2q_f / (r \cdot (1 - \varepsilon)). \quad (17)$$

Преобразуем выражение (15), с учетом (16) и (17), к виду

$$T = q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \varepsilon \cdot \ln \varepsilon / (1 - \varepsilon)) + T_{\text{об}} \quad (18)$$

Подставляя (18) в (13), получаем выражение для определения скорости выноса топливного материала из вентилируемого твэла

$$J = \frac{A \cdot (q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \varepsilon \cdot \ln \varepsilon / (1 - \varepsilon)) + T_{\text{об}})^{1/2}}{P \cdot \Sigma R \cdot \exp(-B / (q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \varepsilon \cdot \ln \varepsilon / (1 - \varepsilon)) + T_{\text{об}}))}$$

В качестве примера рассмотрим использование способа определения J, где в качестве ТМ возьмем диоксид урана, а система вентиляции выполнена в виде центральной осесимметричной трубки с капиллярным наконечником, как показано на фиг.2 и 3.

Примем: $\varepsilon = 0,3$; $\lambda = 2,5$ Вт/(м·град.); $r = 0,01$ м; $l_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $r_1 = 5 \cdot 10^{-5}$ м; $l_2 = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $r_2 = 10^{-3}$ м. Откуда из (6) $\Sigma R \approx 5,14 \cdot 10^5$ 1/м.

Найдем коэффициенты A и B для диоксида урана. Преобразуем уравнение равновесия между паровой и адсорбированной фазой стехиометричного диоксида урана, приведенного в [13],

$$\text{LgP [мм рт.ст.]} = -32258/T + 12,183$$

к виду (10), с учетом Международной системы единиц,

$$P [\text{Па}] = 2,027 \cdot 10^{14} \cdot \exp(-74277/T).$$

Откуда $A^* = 2,027 \cdot 10^{14}$ Па; $B = 74277$ град. Из выражения (14) находим значение коэффициента A =

$$2,9,195 > 10^3 \text{ кг}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{с}^3 \cdot \text{град}^{1/2}), \quad \text{где } d = 3,84 \cdot 10^{-10} \text{ м, } d_{\text{Хе}} = 4,36 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Положим, что после выхода реактора на

проектную мощность по динамике изменения в показаниях датчика температуры оболочки твэла определили время переконденсации $T_{\tau_k}=1800$ с.

Затем в момент времени $\tau+\tau_k$ по показанию датчика тепловой мощности измеряем, предположим, $q_f=5 \cdot 10^5$ Вт/м². Предположим, что зафиксировали давление ГПД, регистрируемое с помощью, например, датчика давления, $P=10^3$ Па и температуру оболочки твэла $T_{об}=2100$ К и оцениваем скорость выноса топливного материала по выражению (3) $J=9,4 \cdot 10^{-12}$ кг/с.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет:

1) обеспечить контроль за скоростью выноса топлива из вентилируемого твэла в реакторных условиях;

2) моделировать рабочие режимы работы вентилируемого твэла реальной конструкции и технологии изготовления;

3) тем самым повысить точность определения скорости выноса топлива через систему вентиляции твэла.

В свою очередь, повышенная точность определения скорости выноса позволяет оценить предельный ресурс работы вентилируемого твэла, в частности термоэмиссионного твэла в составе ЭГК, по фактору выноса топлива или дать рекомендации по улучшению конструкции системы вентиляции твэла и режимов эксплуатации с целью повышения его ресурса.

Источники информации

1. С.Дэшман. Научные основы вакуумной техники. Из-во "Мир", М., 1964, с. 79.

2. Пат. 2086033 РФ, МКИ Н 01 J 45/00. Способ определения скорости выноса оксидного топлива через систему вентиляции топливно-эмиттерного узла термоэмиссионного электрогенерирующего канала/ В.А. Корнилов, В.В. Синявский. - N94023472/07; заявлено 21.06.94; опубл. 27.07.97, Бюл. N21.

3. Корнилов В. Д., Юдицкий В.Д. Моделирование тепло- и массопереноса в сердечнике термоэмиссионного твэла: Атомная энергия, 1982, т.53, вып.2, с. 74-76.

4. Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.Ф. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. М.: Энергоатомиздат, 1987, с.116.

5. Синявский В. В. Методы определения характеристик термоэмиссионных твэлов. М.: Энергоатомиздат, 1990, с.48.

6. Яворский В.М., Детлаф А.Н. Справочник по физике. Из-во "Наука", М., 1971, с.211.

7. [4], с.15.

8. [6], с.213.

9. [6], с.207.

10. [1], с.68.

11. [1], с.12.

12. Котельников Р. Б. и др. Высокотемпературное ядерное топливо. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1978, с.40.

13. Горбань Ю.А. и др. Исследование испарения двуокиси и карбидов урана. Атомная энергия, 1967, т.22, вып.6, с.465-467.

14. Займовский А.С. и др. Тепловыделяющие элементы атомных реакторов, М., Госатомиздат, 1962 г, с.355.

15. [1], с.42.

16. Физические величины, справочник под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, (табл. Менделеева).

Формула изобретения:

Способ определения скорости выноса топливного материала из вентилируемого твэла, включающий в процессе реакторных испытаний твэла измерение тепловой мощности и оценку скорости выноса топливного материала, отличающийся тем, что первоначально измеряют время переконденсации топливного материала τ_k , затем в момент времени $\tau+\tau_k$ измеряют тепловую мощность, фиксируют давление P газообразных продуктов деления в системе вентиляции, температуру $T_{об}$ оболочки твэла и оценивают скорость выноса J топливного материала по выражению

$$J = \frac{A \cdot (q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \epsilon \cdot \ln \epsilon / (1 - \epsilon)) + T_{об})^{1/2}}{P \cdot \sum R \cdot \exp(B / (q_f \cdot r / (2 \cdot \lambda) \cdot (1 + \epsilon \cdot \ln \epsilon / (1 - \epsilon)) + T_{об}))},$$

где q_f - плотность тепловой мощности, поступающей на оболочку твэла из топливного материала в момент времени $\tau+\tau_k$, Вт/м²;

r - внутренний радиус оболочки твэла, м;

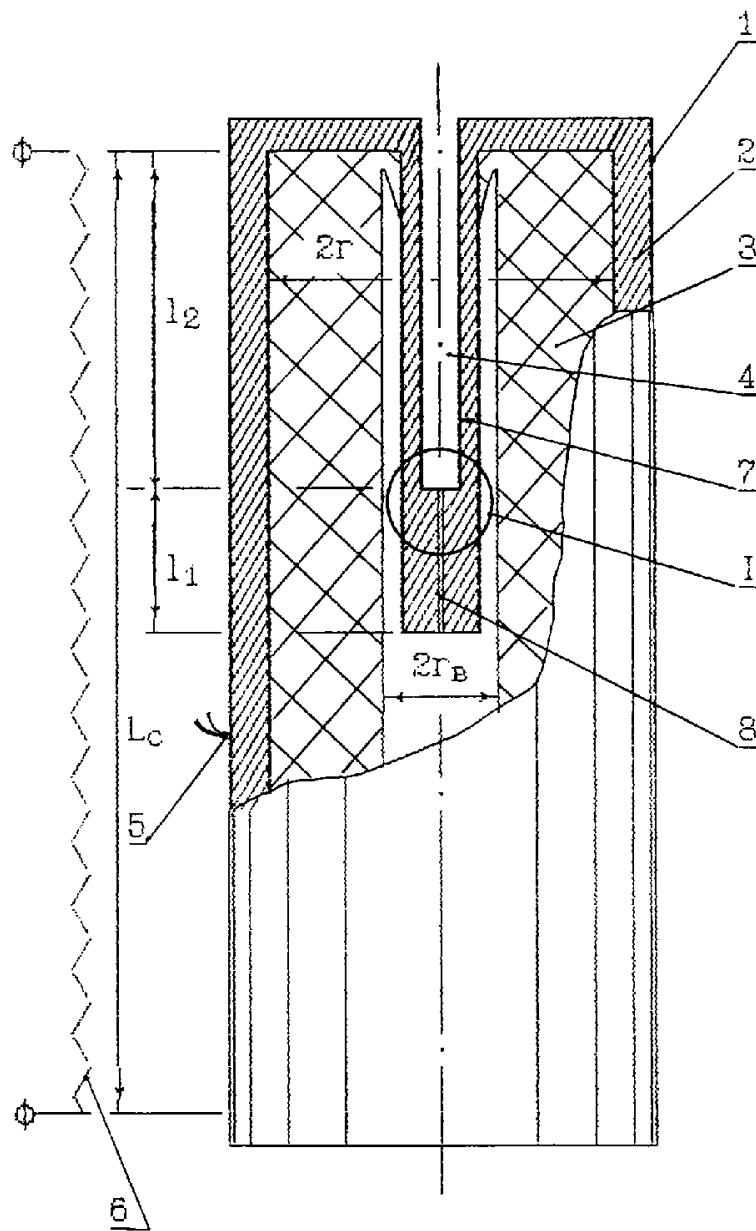
λ - коэффициент теплопроводности топливного материала, Вт/(м·град);

ϵ - относительная объемная доля пористости топливного материала, отн.ед. ;

$\sum R$ - суммарное сопротивление системы вентиляции, 1/м;

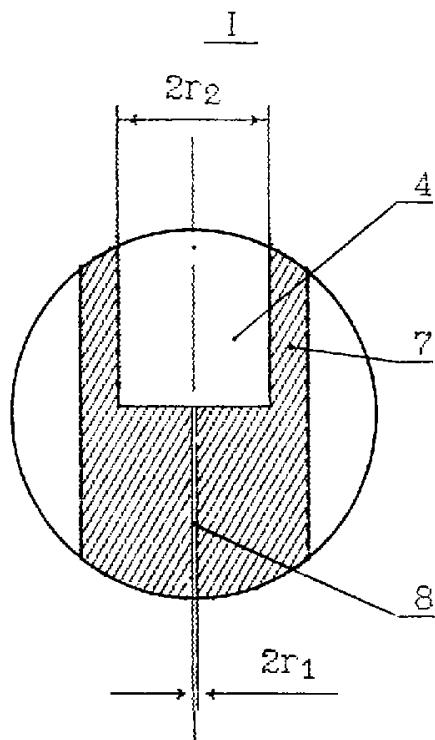
A и B - коэффициенты, зависящие от вида топливного материала, A

[кг²/(м²·с³·град^{1/2})]; B [град]; τ_k [с]; τ [с]; J [кг/с]; P [Па]; $T_{об}$ [K].



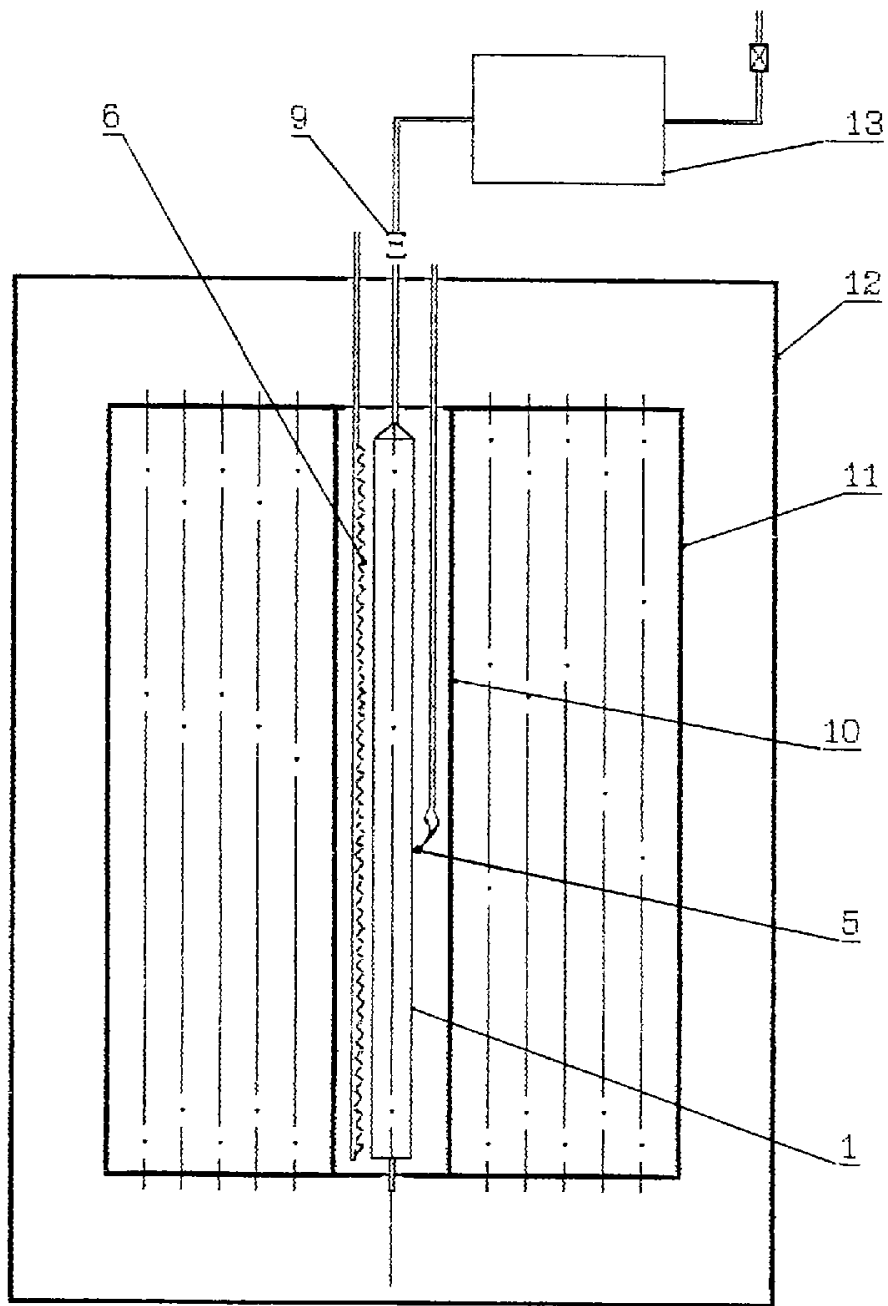
Фиг. 2

RU 2198438 C2



Фиг. 3

RU 2198438 C2



Фиг. 4