

## КОНЦЕПЦИЯ БЛАНКЕТА С НЕПРЕРЫВНОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ ТВЁРДОГО СЫРЬЕВОГО МАТЕРИАЛА

*А.Ю. Пашков*

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Предложена концепция blankets с непрерывной перегрузкой твёрдого сырьевого материала (БНПТ). БНПТ может быть установлен в термоядерном источнике нейтронов (ТИН) или в гибридном реакторе с другим источником нейтронов (например, ускорителем). Материал для трансмутации элементов или производства делящихся изотопов находится в твёрдом состоянии при сравнительно низких температурах. В качестве сырьевого материала рассматриваются фтористые соли, металлический торий и двуокись тория, в качестве теплоносителя — вода, фторуглеродная жидкость и гелий. Особенность БНПТ в том, что облучаемый сырьевой материал в виде СЭЛов (сферических элементов) находится в непрерывном процессе перегрузки. Описана концепция БНПТ, изложена методика его теплогидравлического расчёта и выполнены расчёты нескольких вариантов. Сделана оценка преимуществ и недостатков различных вариантов БНПТ.

**Ключевые слова:** термоядерный источник нейтронов, blanket, непрерывная перегрузка, сферические сырьевые элементы, теплогидравлический расчёт, анализ концепции.

## CONCEPT OF BLANKET WITH CONTINUOUS REPLACEMENT OF SOLID FERTILE MATERIAL

*A.Yu. Pashkov*

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The concept of a blanket with continuous replacement of an irradiated material for a fusion neutron source or for a hybrid reactor with another neutron source, e.g. accelerator, is considered. In this concept the material for the elements transmutation or fissile isotope production is used in the solid state under low temperature. The fluorides, the metallic thorium and the thorium dioxide are considered as such possible fertile materials. The possible coolants are the water, the fluorine-carbonic liquid and the gaseous helium. The materials to be irradiated in this blanket are formed as spherical elements, which are being continuously replaced. The method of thermo-hydraulic calculations is given. The characteristics of different blankets were calculated. The advantages and shortcomings of the different blanket variants are estimated.

**Key words:** fusion neutron source, blanket, continuous material replacement, spherical fertile elements, thermo-hydraulic calculations, analysis of conception.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-2-96-107

### ВВЕДЕНИЕ

Предложена концепция БНПТ, который может быть использован в ТИН, ТЯР или совместно с другим источником нейтронов (например, ускорителем). В дальнейшем в качестве примера будем рассматривать blanket для ТИН.

Проектируемый ТИН предназначен для демонстрации эффективного использования как термоядерных нейтронов из плазмы, так и нейтронов, полученных в blanketе [1]. Существуют различные способы использования нейтронов в ТИН. В зависимости от типа материала возможны трансмутация элементов в blanketе (например, радиоактивных отходов — минорных актинидов), производство искусственного ядерного топлива (например,  $^{233}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ ), наработка трития, генерация мощных потоков нейтронов различной энергии.

В зависимости от предъявляемых требований предложено множество различных конструкций blanketов ТИН (жидкосолевые, твёрдотельные, растворные, высоко- и низкотемпературные и др.) Каждая конструкция имеет свои особенности, причём в большинстве из них требуется время для остановки ТИН и перегрузки облучённого материала.

В данной работе предложена концепция БНПТ, причём эта концепция без существенных изменений может использоваться для реализации различных способов использования нейтронов как в ТИН, так и в других установках, генерирующих нейтроны.

## ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ ТИН

Общий вид одного из предложенных к настоящему времени вариантов конструкции установки ТИН показан на рис. 1. Основные параметры этого варианта ТИН [2]:

Большой радиус $R$ , м . . .	2,5—2,75
Аспектное отношение $A = R/a$ . . .	2,5—2,75
Мощность реакции синтеза в токамаке $P_{th}$ , МВт . . .	~40
Площадь поверхности тороидальной камеры токамака $S$ , м <sup>2</sup> . . .	162—188
Средняя нейтронная нагрузка на первую стенку тороидальной камеры $P_t/S$ , МВт/м <sup>2</sup> . . .	~0,2
Объём плазмы $V$ , м <sup>3</sup> . . .	103—113

Следует отметить, что параметры установки ТИН окончательно не определены, возможно увеличение большого радиуса и соответствующее изменение остальных характеристик. Но использование БНПТ возможно при любых параметрах ТИН.

### КОНЦЕПЦИЯ БЛАНКЕТА С НЕПРЕРЫВНОЙ ПЕРЕГРУЗКОЙ ТВЁРДОГО СЫРЬЕВОГО МАТЕРИАЛА

В рассматриваемом варианте БНПТ, предлагаемом для ТИН, он состоит из отдельных сегментов (по числу секций в установке ТИН). Конструктивными модулями каждого сегмента blankets являются вертикальные металлические трубы круглого поперечного сечения  $D = 250 \times 4$  мм и высотой  $H = 3,5$  м с коническим днищем, на котором расположено перегрузочное устройство. Схема поперечного сечения сегмента blankets представлена на рис. 2. Пространство между модулями (трубами) может быть пустым, а может быть заполнено размножителем или замедлителем нейтронов.

Каждый модуль целиком заполнен однотипными сферическими элементами (называемыми далее СЭЛами) малого диаметра (порядка нескольких см). Массив СЭЛов называется шаровым слоем. В зависимости от предназначения материал СЭЛов может быть различным. Охлаждение модуля производится путём прокачки через шаровой слой теплоносителя. Подобный шаровой слой из СЭЛов использовался в конструкции высокотемпературных газоохлаждаемых ЯР, которая и послужила одним из прототипов предлагаемой концепции.

Важной характеристикой шарового слоя является величина  $m$  — объёмная пористость, которая необходима для расчёта его параметров (в частности, для определения исходных данных для теплогидравлического и нейтронно-физического расчётов). Величина  $m$  определяется как отношение объёма пустот в слое ко всему его объёму. В нашем случае это будет отношение объёма теплоносителя ко всему внутреннему объёму модуля. Как будет показано далее, в предложенной конструкции  $m \sim 0,4$  (возможны и другие значения величины  $m$ ).

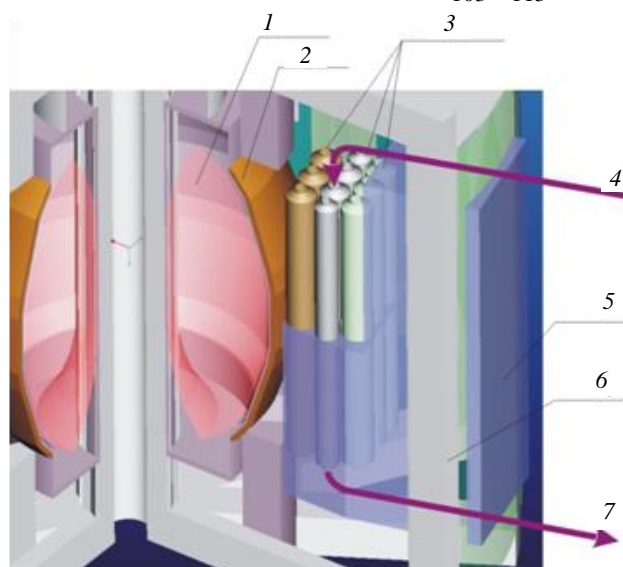


Рис. 1. Общий вид установки ТИН и её blankets: 1 — плазма в разрядной камере; 2 — первая стенка; 3 — модули blankets; 4 — подвод теплоносителя; 5 — наружный корпус blankets; 6 — катушка магнитной системы; 7 — отвод теплоносителя

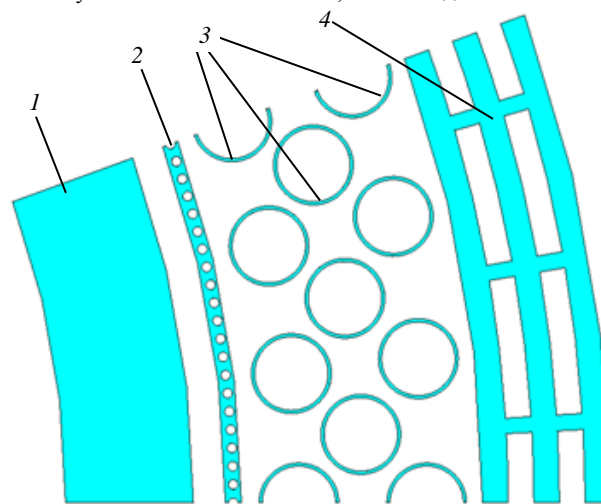


Рис. 2. Поперечное сечение blankets сегмента ТИН: 1 — плазма в разрядной камере; 2 — первая стенка; 3 — модули blankets; 4 — железоводная нейтронная защита

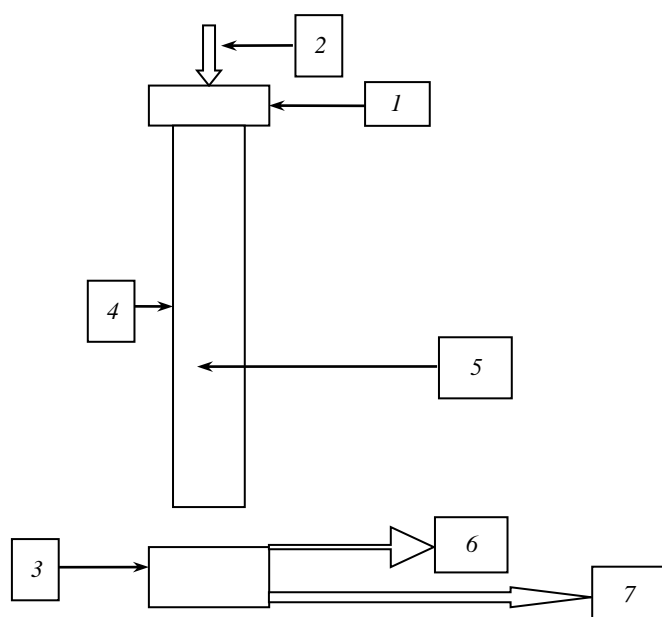


Рис. 3. Схема конструкции модуля бланкета установки ТИН: 1 — загрузочное устройство СЭЛов; 2 — подвод теплоносителя; 3 — устройство перегрузки СЭЛов; 4 — металлический корпус модуля; 5 — засыпка СЭЛов в теплоноситель; 6 — отвод теплоносителя в теплообменник; 7 — отвод СЭЛов на переработку

Принципиальная схема одного модуля представлена на рис. 3. Прокачка теплоносителя осуществляется сверху вниз, как это рекомендовано в [3]. Шаровой слой СЭЛов находится в непрерывном движении. В верхней части каждого модуля находятся загрузочное устройство СЭЛов и патрубков подачи теплоносителя, в нижней части — перегрузочное устройство для СЭЛов и патрубков отвода теплоносителя. Подобная конструкция обеспечивает подвижность всех СЭЛов и позволяет не допустить пребывания их в бланкете под нейтронным облучением в течение времени более заданного, необходимого, например, для наработки определённого количества делящегося топлива или трития. Время пребывания СЭЛов в бланкете ограничено также изменением свойств сырьевого материала под облучением. Заданное время пребывания СЭЛов в бланкете определяет скорость работы перегрузочного устройства.

Из устройства перегрузки СЭЛов они поступают на переработку, способ которой будет определяться видом облучённого материала.

На данную концепцию получен патент Российской Федерации № 143978 с приоритетом от 17 апреля 2014 г.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЁТА МОДУЛЯ БЛАНКЕТА

При указанных размерах ТИН в сегменте бланкета в первом ряду модулей (ближайшему к первой стенке) их разместится пять штук. Общее количество модулей в сегменте зависит от расстояния между осями модулей и числа их рядов. Примем их количество равным 25. При заданных размерах объём одного модуля составит 0,19 м<sup>3</sup> (с учётом примыкающих к нему металлоконструкций) (табл. 1). Объём и процентная доля материалов в сегменте при расстоянии между вертикальными осями модулей, близком к их наружному диаметру, также представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Основные параметры модуля и сегмента бланкета

Объёмы и объёмные доли материалов бланкета	Теплоноситель $V_{м\ теп}$	Сырьевой материал $V_{м\ сэл}$	Металлоконструкции $V_{м\ мет}$	Размножитель нейтронов или пустота	Сумма
Объём материала в модуле бланкета, м <sup>3</sup>	0,064	0,096	0,03	0	0,19
Объёмная доля материала в модуле, %	33,5	50,5	16	0	100
Объём материала в сегменте бланкета, м <sup>3</sup>	1,6	2,4	0,75	1,5	6,25
Объёмная доля материала в объёме сегмента, %	25,6	38,4	12	24	100

Тепловая мощность модуля бланкета определяется по формуле

$$Q_m = q_{v\ теп} V_{м\ теп} + q_{v\ сэл} V_{м\ сэл} + q_{v\ мет} V_{м\ мет}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $q_{v\ теп}$ ,  $q_{v\ сэл}$ ,  $q_{v\ мет}$  — средняя плотность объёмного тепловыделения в теплоносителе, сырьевом материале и металлоконструкциях, Вт/м<sup>3</sup>;  $V_{м\ теп}$ ,  $V_{м\ сэл}$ ,  $V_{м\ мет}$  — объём теплоносителя, сырьевого материала и металлоконструкций в модуле, м<sup>3</sup>. Расход теплоносителя на охлаждение модуля

$$G_{теп} = Q_m / (C_{p\ теп} \Delta T), \text{ кг/с}, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  — подогрев теплоносителя в модуле, °С,  $\Delta T = T_{вых} - T_{вх}$ , где  $T_{вх}$  — температура теплоносителя на входе в модуль, °С;  $T_{вых}$  — температура теплоносителя на выходе из модуля, °С;  $C_{p\ теп}$  — средняя теплоёмкость теплоносителя, Дж/(кг·°С).

## МЕТОДИКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ШАРОВОГО СЛОЯ

Существуют различные модели течения жидкости или газа (в дальнейшем — среда) через шаровой слой. Большинство исследователей используют так называемую внутреннюю модель — течение среды рассматривается как движение отдельных струек по системе изогнутых каналов с внезапными сужениями и расширениями [4]. Схема движения среды в элементарной шаровой ячейке, т.е. в элементарном объёме, ограниченном сферическими поверхностями СЭЛов, принимается следующей: максимальная скорость  $v_0$  среды в струйке возникает в минимальном проходном сечении ячейки (просвете) площадью  $F_{\min}$ .

Главными факторами, влияющими на величину гидравлического сопротивления шарового слоя, являются его объёмная пористость  $m$  и форма пространства между СЭЛами, зависящая от типа их укладки. Возможными типами укладки являются кубическая, октаэдрическая и тетраоктаэдрическая. Для шарового слоя, находящегося в цилиндрическом сосуде с внутренним диаметром  $D_{\text{вн}}$ , важным параметром является относительный диаметр сосуда  $N = D_{\text{вн}}/d$ , где  $d$  — диаметр СЭЛа.

Полное (условное) поперечное сечение шарового слоя  $F_{\text{вн}} = \pi(D_{\text{вн}})^2/4$ . Экспериментально установлено [4], что для СЭЛов в цилиндрическом сосуде при значении  $N > 3,5$  величина  $m$  является функцией только относительного диаметра  $N$ . Колебания значения величины  $m$  наблюдаются лишь вблизи нижнего перегрузочного устройства и в столбе СЭЛов, находящемся над ним, что необходимо учитывать при детальном теплогидравлическом расчёте.

В принятой модели гидравлическое сопротивление шарового слоя  $\Delta P$  определяется по формуле

$$\Delta P = \frac{\xi_{\text{стр}} H \rho (v_0)^2}{2h}, \text{ Па}, \quad (3)$$

где  $\xi_{\text{стр}}$  — коэффициент гидравлического сопротивления струи длиной  $h$ , т.е. в пределах элементарной шаровой ячейки;  $h$  — высота элементарной шаровой ячейки, м;  $H$  — высота обтекаемого шарового слоя, м;  $\rho$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментальные исследования позволили записать формулу (3) в виде, более удобном для расчётов:

$$\Delta P = \frac{0,54KH\rho w^2}{2m^4 d}, \text{ Па}, \quad (4)$$

где  $K$  — коэффициент, учитывающий зависимость коэффициента гидравлического сопротивления  $\xi_{\text{стр}}$  от числа  $\text{Re}_{\text{стр}}$ ;  $w$  — скорость фильтрации среды, посчитанная по сечению  $F_{\text{вн}}$ , т.е. для случая отсутствия в цилиндрическом сосуде СЭЛов, м/с.

$$\text{Re} = wd/\nu \quad (5)$$

число  $\text{Re}$  для скорости фильтрации среды, где  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости среды, м<sup>2</sup>/с. Число  $\text{Re}_{\text{стр}}$  для струи длиной  $h$ , т.е. в пределах элементарной шаровой ячейки, определяется по формуле

$$\text{Re}_{\text{стр}} = \frac{0,45 \text{Re}}{m^{0,5}(1-m)}. \quad (6)$$

Значение коэффициента  $K$  определяется по формуле

$$K = 1 + \frac{10}{\text{Re}_{\text{стр}}^{0,7}} + \frac{100}{\text{Re}_{\text{стр}}}. \quad (7)$$

Значение среднего коэффициента теплоотдачи от СЭЛа к среде  $\alpha_{\text{ср}}$  (далее называемой теплоносителем) зависит от числа  $\text{Re}$  и других параметров. Для значений  $\text{Re} < 10^4$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{0,3(1-m)^{0,35} \text{Re}^{0,65} \lambda_{\text{теп}}}{m^{1,225} d}, \text{ Вт(м}^2\text{·°C)}, \quad (8)$$

для значений  $\text{Re} > 10^4$

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{0,18(1-m)^{0,3} \text{Re}^{0,7} \lambda_{\text{теп}}}{m^{1,25} d}, \text{ Вт(м}^2\text{·°C)}, \quad (9)$$

где  $\lambda_{\text{теп}}$  — теплопроводность теплоносителя, Вт/(м·°C).

Следует отметить, что значение коэффициента теплоотдачи по поверхности СЭЛа распределяется неравномерно. Экспериментально показано [4], что его минимальное значение  $\alpha_{\min}$  составляет 55% от среднего значения, что необходимо учесть в расчётах.

Из уравнения теплового баланса для одного СЭЛа получается формула для оценки температуры его поверхности

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{теп}} + q_{\nu \text{ сэл}} d / (6\alpha_{\text{ср}}), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

где  $T_{\text{теп}}$  — температура омывающего СЭЛ теплоносителя,  $^\circ\text{C}$ ;  $q_{\nu \text{ сэл}}$  — средняя плотность объёмного тепловыделения в СЭЛе,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ .

Температуру в центре СЭЛа  $T_{\text{цен}}$  можно оценить по формуле

$$T_{\text{цен}} = T_{\text{пов}} + q_{\nu \text{ сэл}} d^2 / (24\lambda_{\text{сэл}}), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (11)$$

где  $\lambda_{\text{сэл}}$  — теплопроводность материала СЭЛа,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

## БЛАНКЕТ С СЭЛАМИ ИЗ ТВЁРДОЙ ФТОРИСТОЙ СОЛИ

**Сравнение характеристик жидкосолевого и твёрдосолевого бланкетов.** Одними из первых проектов жидкосолевого бланкета для термоядерных установок являются [5, 6]. В этом типе бланкета в качестве теплоносителя, размножителя нейтронов и сырьевого материала для трансмутации элементов используется расплав фтористых солей (ФС) типа флибак или флайб. Дальнейшим развитием концепции жидкосолевого бланкета, предназначенного для установки ТИН, является [7]. В этом варианте предусматривается содержание тория во ФС. Главной особенностью всех предложенных проектов является использование ФС в жидком виде, т.е. при температуре 500—600  $^\circ\text{C}$ . Преимущества такой концепции бланкета известны: низкое давление в контуре, взрыво- и пожаробезопасность, высокая радиационная и термическая стойкость ФС, возможность непрерывной корректировки элементного состава ФС, что, в свою очередь, позволит исключить остановки на перегрузку бланкета и организовать непрерывное выделение делящихся изотопов и протактиния, отсутствие МГД-потерь при прокачке теплоносителя, возможность получать в бланкете готовое топливо для жидкосолевых ЯР, возможность быстро сменить тип ФС и использовать установку ТИН для трансмутации минорных актинидов или наработки плутония. Принятая концепция и физико-химические свойства ФС гарантируют внутренне присущую безопасность (глубокую подкритичность бланкета) [8].

Но следует отметить, что данному типу бланкета присущи следующие недостатки:

— присутствие в установке больших масс высокотемпературной ФС создаёт потенциальную опасность. Это сильно усложняет конструкцию ТИН (необходимо иметь ёмкость для хранения твёрдой ФС, устройство для её плавления и поддержания её в жидком состоянии в случае кратковременной остановки). Рядом с жидкосолевым контуром, буквально на расстоянии несколько см, будут находиться криогенные катушки электромагнитной системы, что предъявляет к их теплоизоляции очень жёсткие требования;

— существует главная проблема, которая до сих пор тормозит создание жидкосолевых ЯР, — коррозионное взаимодействие расплава ФС с конструкционным материалом, что требует тонкого регулирования редоксного потенциала в расплаве [8].

В качестве конструкционного материала жидкосолевых установок предлагается использовать хастеллой — никелевый сплав, который сильно поглощает нейтроны и активируется ими, что для бланкета нежелательно.

В предлагаемой конструкции БНПТ для установки ТИН предусмотрено использование ФС в твёрдом виде. Как представляется, при этом сохранятся все основные преимущества бланкета с жидкими ФС.

Дополнительными преимуществами предлагаемой конструкции будут:

— низкая температура в бланкете, отсутствие необходимости разогревать ФС перед пуском ТИН и поддерживать её в жидком состоянии при остановках. Высокие температуры не нужны в установке ТИН, которая не предназначена для выработки тепла и электроэнергии;

— отсутствие в установке больших масс высокотемпературной ФС снизит потенциальную опасность;

— снимается главная проблема — коррозионное взаимодействие расплава ФС с конструкционным материалом. В этом случае в качестве конструкционного материала можно использовать циркониевые сплавы, нашедшие широкое применение в ЯР. Это улучшит ядерно-физические характеристики blankets. Возможно также использование малоактивируемых ванадиевых сплавов.

В качестве возможных типов ФС предлагаются в [7]  $30\text{ThF}_4 + 32,55\text{LiF} + 8,05\text{NaF} + 29,4\text{KF}$ , а в [9]  $29\text{ThF}_4 + 71\text{LiF}$  и ещё несколько других солевых композиций (цифры обозначают количество молярных процентов).

Температура плавления этих солей превышает  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому при нормальном режиме работы ТИН соль будет оставаться в твёрдом состоянии.

При проведении экспериментальных работ с ФС [10] установлено, что в твёрдом состоянии ФС практически не обладают коррозионной активностью. Они и их компоненты могут храниться в металлических ёмкостях, не повреждая их. Следует отметить, что в [10] использовались ФС без содержания тория.

### ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ МОДУЛЯ ТВЁРДОСОЛЕВОГО БЛАНКЕТА

В качестве теплоносителя в модуле твёрдосолевого blankets можно использовать как жидкости, так и газы. Далее приведены расчёты нескольких вариантов концепции blankets с различными теплоносителями.

**Модуль blankets с водяным теплоносителем максимальной мощности.** Достоинства и недостатки воды как теплоносителя хорошо известны. В нашем случае к недостаткам следует отнести смягчение спектра нейтронов в blankets и возможность химического взаимодействия воды с ФС используемого состава. Процесс взаимодействия твёрдых ФС с водой исследован пока недостаточно, но чтобы избежать его совсем, предлагается покрывать СЭЛы тонкой полимерной или металлической плёнкой.

Температуру воды на входе в модуль примем  $T_{\text{вх}} = 100\text{ }^\circ\text{C}$  при её давлении 1 МПа. Для оценки влияния на характеристики модуля величины подогрева теплоносителя  $\Delta T$  расчёт выполним для значений выходной температуры теплоносителя  $T_{\text{вых}} = 110, 130$  и  $150\text{ }^\circ\text{C}$ .

В [11] выполнены расчёты характеристик blankets ТИН различного материального состава и, в частности, определено  $q_{\text{в сэл}}$  для ФС типа «флайб», содержащей фтор, литий и бериллий. ФС находилась в blankets в виде нескольких слоёв, один из которых содержал  $^{239}\text{Pu}$  в количестве 11,4% по массе. При мощности термоядерного синтеза 5 МВт для ФС максимальное значение  $q_{\text{в}} = 18\text{ МВт/м}^3$  было в слое с  $^{239}\text{Pu}$ . В слое «чистого флайба», не содержащего  $^{239}\text{Pu}$ , максимальное значение  $q_{\text{в сэл}} = 0,2\text{ МВт/м}^3$ . Значения  $q_{\text{в сэл}}$  для blankets, не содержащего  $^{239}\text{Pu}$ , уменьшаются с ростом расстояния от первой стенки (максимальные значения находятся вблизи её, минимальные — на максимальном удалении от неё).

Рассматриваемая концепция blankets отличается от рассчитанной в [11] — использован другой тип ФС, отсутствуют  $^{239}\text{Pu}$  и твёрдый замедлитель, но есть жидкий теплоноситель, который является и замедлителем, использованы другие конструкционные материалы. Сделаем предположение, что исходное значение  $q_{\text{в сэл}}$  в нашей конструкции модуля blankets будет близко к его значению для «чистого флайба», т.е.  $q_{\text{в сэл}} = 0,2\text{ МВт/м}^3$ . Значение  $q_{\text{в сэл}}$  не будет постоянным — по мере наработки  $^{233}\text{U}$  из тория оно будет увеличиваться.

В запас расчёта примем окончательное значение для СЭЛов  $q_{\text{в сэл}} = 1\text{ МВт/м}^3$  (экспертные оценки дают меньшее значение).

Оценка  $q_{\text{в теп}}$  для теплоносителя (воды) и конструкционных материалов  $q_{\text{в мет}}$  по материалам проектов ТИН была сделана в [12]. Эти же величины были определены для материалов первой стенки в [13] при нейтронной нагрузке на неё  $0,2\text{ МВт/м}^2$ , т.е. как в нашем случае. Примем удельные тепловыделения в материалах рассматриваемой концепции blankets  $q_{\text{в теп}} = 2\text{ МВт/м}^3$  и  $q_{\text{в мет}} = 3\text{ МВт/м}^3$ . Эти значения представляются завышенными, но это пойдёт в запас расчёта.

При отсутствии экспериментальных данных о теплопроводности твёрдой соли используемого состава воспользуемся оценкой  $\lambda_{\text{ФС}} = 0,5\text{ Вт/(м}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$ . Остальные необходимые данные взяты из [14].

Исходные данные для гидравлического расчёта модуля blankets:

Тепловая мощность модуля $Q_{\text{м}}$ , МВт (по формуле (1)) . . .	0,31
Диаметр СЭЛа, м . . .	0,02
Относительный диаметр $N$ . . .	12,1
Пористость $m$ . . .	0,4

Результаты гидравлических расчётов модуля бланкета по формулам (2)—(7) при различных значениях подогрева теплоносителя приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Расчётные гидравлические характеристики модуля бланкета при различных значениях подогрева теплоносителя

Характеристики модуля	Номер варианта		
	1	2	3
Подогрев теплоносителя $\Delta T$	10	30	50
Расход воды на охлаждение модуля, кгс	7,4	2,47	1,48
Гидравлическое сопротивление в модуле, кПа	51,3	5,7	2,1

Расчёт показывает, что уменьшение подогрева воды и соответствующее увеличение её расхода на охлаждение модуля приводят к резкому увеличению гидравлического сопротивления, но при любых разумных значениях величины подогрева это сопротивление составляет приемлемую величину (не более 5% от давления теплоносителя на входе). В дальнейших расчётах примем  $\Delta T = 50$  °С (вариант № 3 в табл. 2). При этом гидравлическое сопротивление будет не более 0,02% от давления теплоносителя на входе.

Чтобы оценить влияние на характеристики модуля диаметра СЭЛов, выполним гидравлический расчёт модуля для диаметров СЭЛов 0,025 и 0,03 м. Остальные исходные параметры модуля, включая тепловую мощность, будут такими же, как в варианте № 3 табл. 2. Результаты расчётов приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Расчётные гидравлические характеристики модуля бланкета при различных значениях диаметра СЭЛов

Характеристики модуля	Диаметр СЭЛа, м	
	0,025	0,03
Относительный диаметр $N$	9,7	8,1
Гидравлическое сопротивление в модуле, кПа	1,53	1,2

Расчёт показывает, что увеличение диаметра СЭЛов при постоянном расходе теплоносителя через модуль приводит к уменьшению гидравлического сопротивления в нем, но не приводит к существенному изменению пористости. Увеличение диаметра СЭЛов может затруднить работу устройства их перегрузки.

Результаты расчётов температуры поверхности СЭЛов и температуры в их центре по формулам (8)—(11) приведены в табл. 4. Расчёт проводился для значений  $d = 0,02, 0,025$  и  $0,03$  м при  $T_{\text{теп}} = T_{\text{вых}} = 150$  °С.

Т а б л и ц а 4. Расчётные значения температуры на поверхности и в центре СЭЛов

Характеристики СЭЛов	Диаметр СЭЛа, м		
	0,02	0,025	0,03
Число Re	2960	3700	4430
$\alpha_{\text{ср}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$	4760	4390	4110
$T_{\text{пов}}, \text{°С}$ (при $\alpha_{\text{ср}}$ )	150,7	150,9	151,2
$\alpha_{\text{мин}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$	2620	2410	2260
$T_{\text{пов}}, \text{°С}$ (при $\alpha_{\text{мин}}$ )	151,3	151,7	152,2
$T_{\text{цен}}, \text{°С}$ (при $\alpha_{\text{ср}}$ )	184	203	226,2
$T_{\text{цен}}, \text{°С}$ (при $\alpha_{\text{мин}}$ )	184,6	203,8	227,2

Расчёт показывает, что при любом разумном диаметре СЭЛа температура на его поверхности и в центре имеет приемлемые значения (значительно меньше температуры плавления ФС). Уменьшение коэффициента теплоотдачи от СЭЛа к теплоносителю приводит лишь к незначительному росту температуры на его поверхности и в центре.

**Модуль бланкета с водяным теплоносителем пониженной мощности.** Ранее были выполнены расчёты для максимальной тепловой мощности модуля. Заложенные в расчёт значения объёмного тепловыделения в материалах будут характерны для зоны бланкета, примыкающей к первой стенке. В зоне, отдалённой от первой стенки, значения объёмного тепловыделения будут значительно меньше. Интерес к расчёту модуля бланкета в этой зоне вызывается следующим обстоятельством: при пониженной тепловой мощности модуля потребуются меньший расход теплоносителя (при сохранении постоянным его подогрева.) Это будет сопровождаться снижением скорости теплоносителя и коэффициента теплоотдачи к нему, что, в свою очередь, приведёт к росту температуры на поверхности и в центре СЭЛов. Чтобы

оценить эти значения температуры, примем предположение, что в этом случае  $q_{v \text{ сэл}} = 0,5 \text{ МВт/м}^3$ ,  $q_{v \text{ теп}} = 1 \text{ МВт/м}^3$ ,  $q_{v \text{ мет}} = 1,5 \text{ МВт/м}^3$ . Тогда  $Q_{\text{м}} = 0,16 \text{ МВт}$ , а остальные исходные данные указаны ранее.

Результаты расчётов этого варианта для водяного теплоносителя:

Подогрев теплоносителя $\Delta T$ , °С . . .	50
Расход воды на охлаждение модуля, кг/с . . .	0,75
Гидравлическое сопротивление в модуле, кПа . . .	0,56
$\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) . . .	2830
$T_{\text{пов}}$ , °С (при $\alpha_{\text{ср}}$ ) . . .	150,6
$\alpha_{\text{мин}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) . . .	1560
$T_{\text{пов}}$ , °С (при $\alpha_{\text{мин}}$ ) . . .	151,1
$T_{\text{цен}}$ , °С (при $\alpha_{\text{ср}}$ ) . . .	167,3
$T_{\text{цен}}$ , °С (при $\alpha_{\text{мин}}$ ) . . .	167,8

Расчёт показывает, что снижение тепловой мощности модуля вдвое по сравнению с номинальной мощностью приводит к пропорциональному снижению расхода теплоносителя и его скорости. Соответственно уменьшается число Re и коэффициент теплоотдачи, но за счёт снижения  $q_{v \text{ сэл}}$  температура на поверхности СЭЛов практически не отличается от той, что была при максимальной мощности модуля. Температура в центре СЭЛа будет ниже, чем при максимальной мощности модуля. Можно сделать вывод, что при любой разумной мощности модуля температуры на поверхности и в центре СЭЛов будут значительно меньше допустимой, т.е. температуры плавления ФС.

**Модуль бланкета с фторуглеродным теплоносителем.** Вода как теплоноситель имеет существенный недостаток — возможность химического взаимодействия с сырьевым материалом. С целью исключения этого можно рассмотреть возможность использования в качестве теплоносителя перфторбензола. Его химическая формула  $\text{C}_6\text{F}_6$ , температура кипения при давлении 1 МПа  $\sim 157$  °С. Все свойства этого теплоносителя взяты из [15]. К его преимуществам можно отнести негорючесть, взрывобезопасность, термическую стойкость, химическую инертность и нетоксичность, хорошие теплофизические и диэлектрические свойства, слабое поглощение нейтронов.

К его недостаткам следует отнести высокую стоимость, слабую изученность (недостаточно исследованы теплофизические свойства и отсутствуют данные о поведении под нейтронным облучением), выделение фтористых токсичных продуктов при разложении. Последний недостаток в нашем случае не является существенным, так как использование в бланкете ФС и соответственно фтористых технологий уже обуславливает наличие в установке ТИН подобных токсичных продуктов. Важным является отсутствие химического взаимодействия ФС с теплоносителем.

В настоящее время фторуглеродные теплоносители не рассматриваются в качестве возможных для их применения в ЯР. Вопрос о возможности их применения в термоядерных установках может быть решён после тщательного исследования их свойств. Возможно, что облучение быстрыми нейтронами не приводит к быстрой деградации свойств фторуглеродного теплоносителя.

Предполагается, что удельное тепловыделение в перфторбензоле, СЭЛах и конструкционных материалах незначительно отличается от значений, используемых в варианте с водяным теплоносителем, поэтому максимальную тепловую мощность модуля примем такой же — 0,31 МВт. Давление перфторбензола на входе в модуль 1 МПа, температура 100 °С, остальные исходные данные указаны ранее. Результаты гидравлических расчётов модуля бланкета этой конструкции приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Расчётные гидравлические характеристики модуля бланкета при различных значениях подогрева теплоносителя

Характеристики модуля	Номер варианта	
	1	2
Подогрев теплоносителя $\Delta T$	30	50
Расход перфторбензола на охлаждение модуля, кг/с	10,54	6,32
Гидравлическое сопротивление в модуле, кПа	70,8	25,7

Расчёт показывает, что при любых разумных значениях величины подогрева гидравлическое сопротивление модуля составляет приемлемую величину. Для дальнейших расчётов примем величину подогрева перфторбензола в модуле равной 50 °С (вариант № 2). Ранее выполненный расчёт (см. табл. 3) показал, что увеличение диаметра СЭЛов при постоянном расходе теплоносителя через модуль приводит к уменьшению гидравлического сопротивления в нём. Следовательно, и в рассматриваемом варианте уве-



личение диаметра СЭЛов не приведёт к увеличению гидравлического сопротивления модуля, так что нет необходимости его рассчитывать.

Результаты расчётов температуры поверхности СЭЛов и температуры в их центре (расчёт проводился для значения  $d = 0,02$  м и при  $T_{\text{теп}} = 150$  °С):

Число Re . . .	9600
$\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) . . .	1770
$T_{\text{пов}}$ , °С (при $\alpha_{\text{ср}}$ ) . . .	151,9
$\alpha_{\text{мин}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) . . .	970
$T_{\text{пов}}$ , °С (при $\alpha_{\text{мин}}$ ) . . .	153,4
$T_{\text{цен}}$ , °С (при $\alpha_{\text{ср}}$ ) . . .	185,2
$T_{\text{цен}}$ , °С (при $\alpha_{\text{мин}}$ ) . . .	186,7

Расчёт показывает, что при охлаждении модуля перфторбензолом температуры на поверхности и в центре СЭЛов будут иметь приемлемые значения (значительно ниже температуры плавления ФС).

**Сравнение свойств жидких и газовых теплоносителей.** Применение рассмотренных жидких теплоносителей в бланкете имеет существенный недостаток. Эти жидкости являются хорошими замедлителями нейтронов, причём они будут занимать до четверти всего объёма сегмента бланкета, что приведёт к существенному смягчению спектра нейтронов. В то же время для наработки делящегося топлива и предотвращения его деления в бланкете желательнее иметь максимально жёсткий спектр нейтронов. Для выполнения этого требования возможно применение в качестве теплоносителя газа, например, гелия. Он имеет хорошие теплофизические свойства, не поглощает нейтроны и не активизируется ими, термически и химически стабилен, не взаимодействует с магнитным полем, хорошо изучен и применялся в ЯР. Для нашей концепции особенно ценными свойствами гелия являются как его химическая инертность, исключая взаимодействие с сырьевым и конструкционным материалами, так и отсутствие замедления нейтронов в нём. Следует отметить, что в установке ТИН в любом случае будет присутствовать гелий, так как жидкий гелий будет применяться в криогенной системе, а газообразный — для охлаждения криогенной тепловой защиты. Это облегчает применение гелия как теплоносителя в бланкете.

К недостаткам гелия следует отнести необходимость повышенного давления в контуре теплоносителя, высокую стоимость и текучесть, но это не имеет решающего значения.

**Модуль бланкета с гелиевым теплоносителем.** Температуру гелия на входе в модуль примем  $T_{\text{вх}} = 100$  °С, давление 4 МПа, температуру на выходе 150 °С. Удельные тепловыделения в материалах примем такими же, как в варианте модуля с водяным теплоносителем максимальной мощности, тепловыделение в гелии считаем пренебрежимо малым. Тогда по (1)  $Q_{\text{м}} = 0,19$  МВт, остальные исходные данные указаны ранее.

Результаты расчётов этого варианта:

Расход гелия на охлаждение модуля, кг/с . . .	0,73
Гидравлическое сопротивление в модуле, кПа . . .	98
$\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) . . .	5250
$T_{\text{пов}}$ , °С (при $\alpha_{\text{ср}}$ ) . . .	150,6
$\alpha_{\text{мин}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°С) . . .	2890
$T_{\text{пов}}$ , °С (при $\alpha_{\text{мин}}$ ) . . .	151,2
$T_{\text{цен}}$ , °С (при $\alpha_{\text{ср}}$ ) . . .	184
$T_{\text{цен}}$ , °С (при $\alpha_{\text{мин}}$ ) . . .	184,6

Расчёт показывает, что замена водяного теплоносителя на гелий не приводит к существенному изменению теплогидравлических характеристик модуля. Гидравлическое сопротивление модуля составляет приемлемую величину — не более 2,5% от давления на входе. Максимальные температуры на поверхности и в центре СЭЛов практически такие же, как при охлаждении их водяным теплоносителем, т.е. значительно ниже температуры плавления ФС.

## БЛАНКЕТ С СЭЛами ИЗ ДВУОКИСИ ТОРИЯ

При создании бланкета, предназначенного для наработки <sup>233</sup>U, возможно использование в качестве сырьевого материала чистой двуокиси тория ThO<sub>2</sub>. В этом качестве она имеет следующие преимущества [16]: есть опыт её использования в ЯР и последующей радиохимической переработки, высокое содержание тория в ней (88%), высокая температура плавления (более 3000 °С), отсутствие взаимодействия с

воздухом, с водой  $\text{ThO}_2$  не взаимодействует при температуре до  $315^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что при нейтронном облучении в ЯР смешанного топлива из  $\text{UO}_2$  и  $\text{ThO}_2$  наблюдаются его умеренное распухание, образование трещин и осколочное газовыделение. Вероятно, эти же явления будут иметь место в случае изготовления СЭЛов из  $\text{ThO}_2$ .

**Модуль бланкета с водяным теплоносителем.** Температуру воды на входе в модуль примем  $T_{\text{вх}} = 100^\circ\text{C}$  при давлении 1 МПа, температуру на выходе  $150^\circ\text{C}$ . Примем  $q_{\text{в сэл}} = 8 \text{ МВт/м}^3$  (максимальное значение по оценке [11]). Значения  $q_{\text{в теп}}$  и  $q_{\text{в мет}}$  примем такими же, как и для модуля твёрдосолевого бланкета с водяным охлаждением максимальной мощности. Теплопроводность  $\text{ThO}_2$  сильно зависит от температуры и снижается с её ростом. В ожидаемом диапазоне температуры СЭЛов  $100\text{—}180^\circ\text{C}$   $\lambda_{\text{сэл}} \sim 7 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$ . По (1)  $Q_{\text{м}} = 1 \text{ МВт}$ , остальные исходные данные указаны ранее.

Результаты расчётов этого варианта:

Расход воды на охлаждение модуля, кг/с . . .	4,8
Гидравлическое сопротивление в модуле, кПа . . .	21,7
$\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) . . .	15200
$T_{\text{пов}}$ , °C . . .	151,8
$\alpha_{\text{мин}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) . . .	8360
$T_{\text{пов}}$ при $\alpha_{\text{мин}}$ , °C . . .	153,2
$T_{\text{цен}}$ , °C . . .	170,8
$T_{\text{цен}}$ при $\alpha_{\text{мин}}$ , °C . . .	172,2

Расчёт показывает, что увеличение тепловой мощности модуля приводит к увеличению расхода теплоносителя через него, но гидравлическое сопротивление хотя и увеличивается, но составляет приемлемую величину — не более 2,2% от давления на входе.

За счёт роста коэффициента теплоотдачи и более высокой теплопроводности  $\text{ThO}_2$  по сравнению с ФС максимальная температура на поверхности и в центре СЭЛов будет значительно ниже допустимой.

**Модуль бланкета с гелиевым теплоносителем.** Температуру гелия на входе в модуль примем  $T_{\text{вх}} = 100^\circ\text{C}$ , давление 4 МПа, температуру на выходе  $220^\circ\text{C}$ . Увеличение подогрева теплоносителя необходимо, чтобы снизить гидравлические потери в модуле. Высокая температура плавления  $\text{ThO}_2$  позволяет иметь такую и даже большую температуру теплоносителя на выходе из модуля. Удельные тепловыделения в материалах примем такими же, как в варианте модуля с водяным теплоносителем, тепловыделение в гелии считаем пренебрежимо малым. Тогда по (1)  $Q_{\text{м}} = 0,86 \text{ МВт}$ , остальные исходные данные указаны ранее.

Результаты расчётов этого варианта:

Расход гелия на охлаждение модуля, кг/с . . .	1,4
Гидравлическое сопротивление в модуле, МПа . . .	0,38
$\alpha_{\text{ср}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) . . .	8840
$T_{\text{пов}}$ , °C . . .	223
$\alpha_{\text{мин}}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C) . . .	4860
$T_{\text{пов}}$ при $\alpha_{\text{мин}}$ , °C . . .	225,5
$T_{\text{цен}}$ , °C . . .	242
$T_{\text{цен}}$ при $\alpha_{\text{мин}}$ , °C . . .	244,5

Расчёт показывает, что замена водяного теплоносителя на гелий в данном варианте приводит к существенному увеличению гидравлического сопротивления в модуле, но всё же оно составляет приемлемую величину — не более 10% от давления на входе. Максимальная температура на поверхности и в центре СЭЛов также будет выше, но останется значительно ниже допустимой.

## БЛАНКЕТ С СЭЛами ИЗ ЧИСТОГО ТОРИЯ

Результаты расчётов бланкета с СЭЛами из двуокиси тория показывают, что в качестве сырьевого материала можно использовать чистый металлический торий. В этом случае достигается максимальное содержание тория в СЭЛах и минимальное содержание примесей, поглощающих нейтроны.

Известно, что металлический торий взаимодействует с водой с образованием его двуокиси и водорода, поэтому использование водяного теплоносителя нежелательно, но вполне возможно использование гелия как теплоносителя. Так как по массовому содержанию тория чистый торий и его двуокись очень близки, то удельное тепловыделение в чистом тории можно принять таким же, как и в его двуокси-

си. Гидравлическое сопротивление и температура на поверхности СЭЛов в модуле будут такими же, как и в модуле с СЭЛами из двуокиси тория. Температура в центре СЭЛов будет ниже, так как теплопроводность металлического тория выше, чем теплопроводность его двуокиси.

Основной проблемой в данном случае представляется изменение свойств металлического тория под нейтронным облучением.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчёты показывают принципиальную возможность создания бланкета предложенной концепции. При любом из рассмотренных теплоносителей и при любых разумных значениях диаметра СЭЛа и подогрева теплоносителя в модуле гидравлическое сопротивление будет незначительным и не превысит нескольких процентов от начального давления на входе в модуль.

При любом теплоносителе температура поверхности СЭЛов не будет превышать его температуру более чем на 6 °С (даже в местах с пониженным значением коэффициента теплоотдачи, т.е. в местах соприкосновения СЭЛов). Температура в центре СЭЛов из любого рассмотренного материала в самом неблагоприятном для охлаждения случае не будет превышать температуру теплоносителя более чем на 77 °С, что гарантирует поддержание СЭЛов в твёрдом состоянии и не создаст в них термических напряжений, превышающих допустимые.

В работе были рассмотрены возможности использования в качестве материала СЭЛов ФС, чистого тория и его двуокиси. Даже не выполняя расчётов, можно сказать, что допустимо использовать в качестве сырьевого материала эвтектику литий—свинец или литийсодержащие керамики. Значение  $q_{\nu}$  СЭЛ в них будет примерно таким же, как во ФС, а их теплопроводность выше. Это гарантирует, что температура СЭЛов и гидравлические потери не превысят допустимые.

Опыт эксплуатации ЯР со сферическими твэлами, частично обобщённый в [17], показал надёжность и эффективность работы активной зоны такой конструкции. Не было зафиксировано каких-либо аварийных ситуаций, связанных с твэлами. Хотя ЯР подобной конструкции не нашли широкого применения, это произошло по причинам, не связанным с применением в активной зоне сферических твэлов.

К недостаткам бланкета можно отнести необходимость дополнительных устройств для перегрузки СЭЛов и их повторного изготовления. Существует возможность слипания отдельных СЭЛов.

Для дальнейшей работы над предложенной конструкцией необходимо уточнить свойства твёрдых ФС и других возможных сырьевых материалов (теплофизические, механические, химические и пр.), а также выполнить нейтронно-физический расчёт бланкета с целью определить коэффициент наработки делящихся изотопов, трития и уточнить величины удельного тепловыделения в материалах.

Для принятия решения об использовании фторуглеродного теплоносителя необходимо уточнение его характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кутеев Б.В. и др.** Нейтронно-физические исследования термоядерного источника нейтронов для получения максимального потока тепловых нейтронов. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, вып. 1, с. 64.
2. **Kuteev B.V., Azizov E.A.** Development of DEMO-FNS Tokamak for fusion and hybrid technologies. — In: Proc. 25-th IAEA Fusion Energy Conf. Saint Peterburg, Russia, 2014, Paper FIP/P7-24.
3. **Богоявленский Р.Г. и др.** Перегрузка шаровых твэлов в реакторных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. **Богоявленский Р.Г.** Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. — М.: Атомиздат, 1978.
5. **Блинкин В.Л., Новиков В.М.** Оптимальная симбиозная система реакторов синтеза и деления на расплавах солей. — В сб.: Труды 2-го советско-американского семинара синтез-деление. 14 марта—1 апреля 1977 г. — М.: Атомиздат, 1978, с. 20.
6. **Новиков В.М. и др.** Жидкосольевые бланкеты термоядерного реактора: преимущества и проблемы. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1985, вып. 4, с. 19.
7. **Разработка** эскизного проекта демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ТИН) с мощностью D—T-синтеза не менее 10 МВт. Отчёт о научно-исследовательской работе. Федеральное государственное бюджетное учреждение НИЦ «Курчатовский институт». Инв. № 230-15/6969-12 от 5.12.2012.
8. **Велихов Е.П., Азизов Э.А. и др.** Концепция «зеленой» ядерной энергетики. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, вып. 1, с. 5.

9. **Игнатьев В.В.** Выбор материалов для жидкосолевого ториевого blankets ТИН. — В сб.: Материалы совещания по стационарным режимам и технологическим системам ТИН в НИЦ КИ, КЦЯТ, ИФТ. Москва, 18—19 февраля 2013 г.
10. **Игнатьев В.В. и др.** Тепловые характеристики закрытого термосифона с жидкосолевым теплоносителем: Препринт ИАЭ 4314/3. — М., ЦНИИАтоминформ, 1986.
11. **Zhirkin A.V., Kuteev B.V.** The neutronics analysis of blankets for the hybrid fusion neutron source. — In: Proc. 25th IAEA. Fusion Energy Conf. Saint Peterburg, Russia, 2014, Paper FNS/P7-25.
12. **Пашков А.Ю.** Оценка возможных аварий в первой стенке термоядерного источника нейтронов, вызванных отказами в системе её охлаждения. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, вып. 3, с. 26.
13. Разработка технического задания на эскизное проектирование демонстрационного термоядерного источника нейтронов (ТИН). Этап 3 (промежуточный). **Отчёт** о научно-исследовательской работе. Федеральное государственное бюджетное учреждение НИЦ «Курчатовский институт». Инв. № 140-17/6935-11 от 9.12.2011.
14. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. — М.: Атомиздат, 1968.
15. **Негорючие** теплоносители и гидравлические жидкости. Свойства, коррозия, технология. Справочное руководство. Под ред. А.М. Сухотина. — Л.: Химия, 1979.
16. **Шведов В.П. и др.** Ядерная технология. — М.: Атомиздат, 1979.
17. **Бедениг Д.** Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы. — М.: Атомиздат, 1975.



Александр Юрьевич Пашков,  
н.с.; НИЦ «Курчатовский  
институт», 123182 Москва,  
пл. Академика Курчатова 1,  
Россия  
A\_Yu\_pashkoff@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2015 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с. 96—107.