

О ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА С УЧАСТИЕМ НЕЙТРОНОВ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ ПЛАЗМЫ

А.Н.Шмелев, Г.Г.Куликов

НИЯУ МИФИ. 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



При работе ядерных реакторов протекает цепная реакция деления (ЦРД) тяжелых ядер. В термоядерных установках с магнитным удержанием (DT)-плазмы в результате реакции синтеза наряду с выделением энергии рождаются нейтроны. В силу чрезвычайно низкой концентрации ионов в плазме по сравнению с концентрацией атомных ядер вblankете баланс расхода нейтронов в установке практически полностью определяется физическими свойствами blankета.

Цель работы заключается в выявлении физических условий, когда поглощение нейтронов в плазме и вblankете окажется сопоставимым. Такие условия могут возникнуть, во-первых, если в плазме в качестве компонента содержится нуклид с большим сечением поглощения нейтронов (например, ^3He , ^6Li и ^{10}B), во-вторых, если вblankете одновременно применяются материалы с рекордно низким сечением захвата нейтронов (например, ^{208}Pb , тяжелая вода, графит). Таким образом, в термоядерной установке тоже может возникнуть управляемая цепная реакция синтеза с участием нейтронов (ЦРСн).

При выполнении работы использовалась концепция малонейтронного ($\text{D}-^3\text{He}$)-цикла. Для обоснования идеи предлагается применять установки ($\text{DT}-^3\text{He}$)-топливного цикла со слабо поглощающим нейтроны blankетом.

Получены следующие результаты.

1. В отличие от малонейтронного ($\text{D}-^3\text{He}$)-топливного цикла предлагаемый ($\text{DT}-^3\text{He}$)-топливный цикл привлекает своей противоположностью по потенциальной возможности производства нейтронов, т.е. тем, что в нем могут генерироваться нейтроны, которые к тому же размножаются в ЦРСн.

2. Воспроизводство трития в результате $n(^3\text{He},\text{T})^4\text{H}$ -реакции перемещается изblankета (как это обычно рассматривается) в объем плазмы. Тритий будет воспроизводиться в плазме, где и должен расходоваться, что улучшит его использование.

3. Обеспечивается дополнительный нагрев плазмы в результате поглощения нейтронов в плазме.

Термоядерный источник нейтронов считается самым «богатым» – в нем генерации нейтронов сопутствуют относительно маломасштабные энергетические процессы. Рассматриваемая термоядерная установка со слабопоглощающим нейтроны blankетом позволяет создать вblankете

высокую плотность потока нейтронов. **Общий вывод:** такие термоядерные установки можно будет использовать для быстрой трансмутации долгоживущих продуктов деления с малым сечением поглощения нейтронов и, возможно, даже без их предварительного изотопного разделения.

Ключевые слова: термоядерная установка, бланкет, сечение поглощения нейтронов, высокая плотность потока нейтронов, трансмутация.

ВВЕДЕНИЕ

При работе ядерных реакторов протекает цепная реакция деления тяжелых ядер (ЦРД) [1]. Деление урана под действием нейтронов не только приводит к выделению энергии, но и сопровождается генерацией нейтронов следующего поколения, обеспечивающих последующие деления урана и генерацию новых нейтронов.

В термоядерных установках с магнитным удержанием (DT)-плазмы в результате реакции синтеза наряду с выделением энергии тоже рождаются нейтроны (термоядерные с энергией $E_n = 14.1$ МэВ). Эти нейтроны размножаются в бланкете, замедляются и диффундируют по бланкету, претерпевая утечку и поглощение. Естественно, что в результате диффузии эти нейтроны в плазменной камере взаимодействуют с плазмой. Однако в силу чрезвычайно низкой концентрации ионов в плазме по сравнению с концентрацией атомных ядер в бланкете баланс расхода нейтронов в установке практически полностью определяется физическими свойствами бланкета.

Если в плазме будут содержаться компоненты с большим сечением поглощения нейтронов, можно ожидать, что некоторая значимая доля нейтронов будет поглощаться также и в плазме. В качестве таких компонентов можно назвать ${}^3\text{He}$, ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$, которые рассматриваются в перспективных топливных циклах управляемого термоядерного синтеза. В результате, например, реакции ${}^3\text{He}(n,{}^1\text{H})\text{T}$ в плазме появляется тритий, взаимодействующий с дейтерием (что приводит к новой реакции синтеза с генерацией нейтрона), а энергия реакции передается плазме, нагревая ее (что приводит к интенсификации реакций синтеза с дополнительной генерацией нейтронов). Таким образом, в термоядерной установке тоже может возникнуть управляемая цепная реакция синтеза с участием нейтронов (ЦРСн).

Возможность такой реакции уже рассматривалась в 40-е и 50-е гг. прошлого столетия при разработке термоядерного оружия. Тогда предполагалось использовать эту цепную реакцию в первом испытании термоядерного устройства «Mike» (испытание США 1 ноября 1952 г. на атолле Эниветок в Тихом океане) [2]. В Советском Союзе предполагалось использовать эту цепную реакцию синтеза с участием нейтронов при испытании «слойки» А.Д. Сахарова (12 августа 1953 г. на Семипалатинском полигоне) [3, 4]. И в СССР, и в США реакция с использованием ${}^6\text{LiD}$ (это соединение в то время ласково называлось «лидочкой») была успешно применена при испытаниях последующих термоядерных зарядов [3, 4]. Строго говоря, упомянутую реализацию ЦРСн можно отнести к категории «неуправляемого» термоядерного синтеза.

В работе рассматриваются условия, при которых **управляемая** ЦРСн может рассматриваться как значимая для баланса протекающих процессов в термоядерном реакторе.

ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ СИНТЕЗА С УЧАСТИЕМ НЕЙТРОНОВ

Рассматривать цепную реакцию синтеза с участием нейтронов (ЦРСн) целесообразно применительно к термоядерным установкам с магнитным удержанием плаз-

мы, снабженным бланкетами для преобразования энергии. Принципиальная особенность таких установок состоит в сочетании плазменной зоны с низкой концентрацией компонентов и зоны бланкета с твердыми (жидкими) материалами (т.е. зоны с намного порядков более высокими концентрациями нуклидов). Утилизация нейтронов, генерируемых термоядерными реакциями, в установке с такими разнородными зонами, как правило, ограничивается бланкетом, а плазма для нейтронов практически прозрачна.

Однако можно представить себе условия, когда поглощение нейтронов в плазме и в бланкете окажется сопоставимым. Такое положение может возникнуть, **во-первых**, если в плазме в качестве компонента содержится нуклид с большим сечением поглощения нейтронов, **во-вторых**, если одновременно в бланкете применяются материалы с рекордно низким сечением захвата нейтронов.

Для плазмы таким нуклидом (сильно поглощающим нейтроны) с малым атомным весом может быть, например, ${}^3\text{He}$, который характеризуется большим сечением поглощения тепловых нейтронов (в тепловой точке ~ 5330 барн) в реакции ${}^3\text{He}(n,{}^1\text{H})\text{T}$. Энергия этой экзотермической реакции составляет $+0.764$ МэВ, которая может использоваться для нагрева плазмы. Если так, то можно говорить об использовании не только, например, $(\text{D}-{}^3\text{He})$ -, но и даже $(\text{DT}-{}^3\text{He})$ -термоядерного топливного цикла.

Для бланкета в качестве нуклидов с малым сечением поглощения могут рассматриваться, например, ${}^{208}\text{Pb}$, D (тяжелая вода), графит, для которых сечение поглощения тепловых нейтронов составляет величину порядка или менее миллибарна.

Далее будем опираться на использование изотопа ${}^3\text{He}$ (отметим, что гелий уже рассматривается в качестве примеси для дополнительного нагрева плазмы методом ионно-циклотронного резонанса [5]). Традиционно считается, что термоядерные нейтроны будут размножаться в $(n,2n)$ - и $(n,3n)$ -реакциях с материалами бланкета (см. табл. 1 [6]), замедляться и диффундировать в его объеме.

Таблица 1

Полное число нейтронов в бланкете (бесконечных размеров), замедляющихся ниже порога $(n,2n)$ -реакции, в расчете на один термоядерный нейтрон [6]

Элемент	Be	C	Fe	Mo	W	Pb
Концентрация атомов, 10^{+24} яд/см ³	0.120	0.08	0.085	0.064	0.063	0.063
Полное число нейтронов, замедляющихся под порог $(n,2n)$ -реакции	1.78	1.0	1.29	1.84	1.82	1.84

Из таблицы видно, что термоядерные нейтроны существенным образом могут размножиться в слое бланкета (Pb, Mo, W, Be), прилегающем к первой стенке.

Из всех нейтронов при дальнейшем замедлении и диффузии некоторая часть будет поглощаться ядрами ${}^3\text{He}$ в плазме и приводить вновь к рождению ядра трития, участию его в термоядерной реакции и вновь к рождению нейтронов. Таким образом, замкнется звено цепной нейтронной реакции, включающей в себя и термоядерные реакции. Если основным компонентом будет (DT) -плазма, то рождающиеся в результате (DT) -синтеза нейтроны будут также размножаться и диффундировать в бланкете, в плазменной камере и захватываться ядрами ${}^3\text{He}$, т.е. участвовать в цепной реакции.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗНАЧИМОЙ ЦРСН (ПРЕОДОЛЕНИЕ «ПРОКЛЯТИЯ» СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ И БЛАНКЕТА)

Скорость взаимодействия нейтронов с нуклидами плазмы и бланкета оценивается по формуле

$$F = \langle \sigma \cdot V_{\text{отн}} \rangle \cdot n_{\text{яд}} \cdot n_n,$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость движения нейтронов и ядер среды; σ – микроскопическое сечение взаимодействия нейтронов с ядрами среды; $\langle \sigma \cdot V_{\text{отн}} \rangle$ – произведение сечения реакции сталкивающихся частиц на относительную скорость, усредненное по распределению их скоростей; $n_{\text{яд}}$, n_n – концентрации ядер (в плазме или в бланкете) и нейтронов.

Из формулы видно, что скорость взаимодействия пропорциональна плотности нейтронов и плотности того или иного нуклида либо в плазме, либо в бланкете. Однако плотность термоядерной плазмы составляет порядка 10^{14} – 10^{16} 1/см³, а в бланкете (содержащем твердые или жидкие материалы) ядерная плотность нуклидов $\sim 10^{22}$ 1/см³. Иными словами, разница плотностей достигает шести – восьми порядков (!). Казалось бы, что при такой разнице в концентрациях долю реакций поглощения нейтронов нуклидами плазмы можно считать пренебрежимо малой (по сравнению с реакциями поглощения в бланкете) и поэтому их можно просто не учитывать, т.е. нейтроны будут поглощаться, главным образом, в материалах бланкета, а не в плазме. Однако в некоторых случаях это оказывается не так.

В качестве примера рассмотрим процессы в термоядерной системе с (DT–³He)-плазмой и с бланкетом, содержащим, например, ²⁰⁸Pb (можно рассмотреть также и использование тяжелой воды). На рисунке 1 показаны графики зависимости сечений поглощения нейтронов гелием-3 в реакции ³He(n,¹H)T, а также радиационного захвата в реакциях ²⁰⁸Pb(n, γ)...²⁰⁹Pb, D(n, γ)T и ³He(n, γ)⁴He.

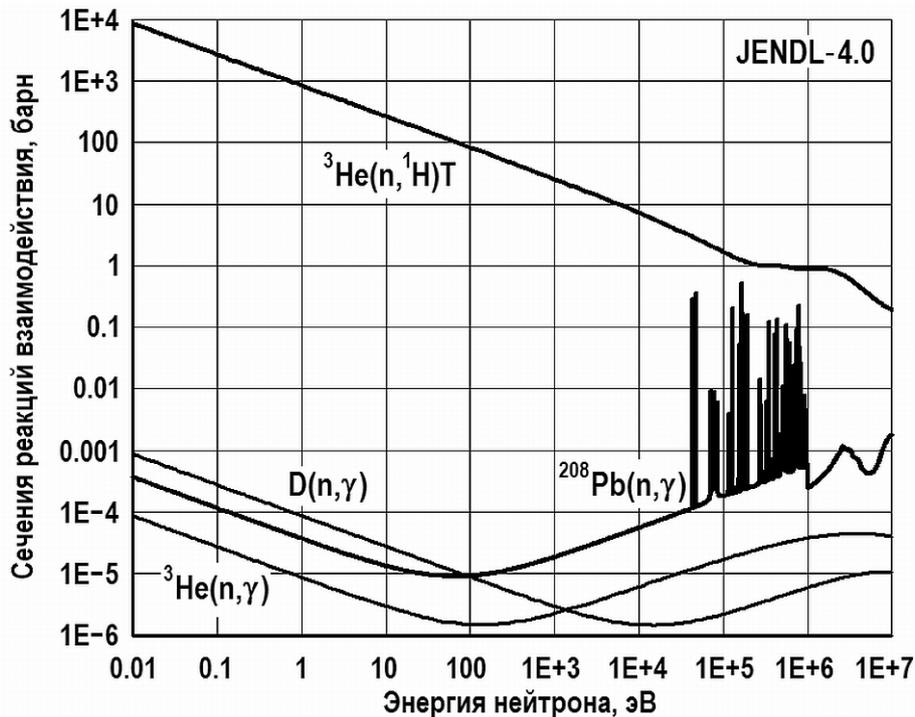


Рис. 1. Зависимость сечения поглощения (радиационного и с вылетом заряженных частиц) нейтронов в реакции ³He(n,¹H)T и радиационного захвата в реакциях ²⁰⁸Pb(n, γ)...²⁰⁹Pb, D(n, γ)T и ³He(n, γ)⁴He

Хорошо видно, что разница в сечении поглощения нейтронов в результате реакции ³He(n,¹H)T (в плазме) и радиационного захвата ²⁰⁸Pb, D (в материалах бланкета) достигает семи (!) порядков.

При оценке скорости реакций нужно учитывать скорость относительного движе-

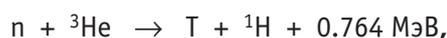
ния нейтронов и ядер гелия-3 в плазме и среднюю скорость относительного движения нейтронов и ядер свинца-208 в бланкете. Будем считать, что нейтроны уже замедлились до тепловых энергий ~ 0.025 эВ, а плазма имеет температуру ионной компоненты 25 кэВ. Разница в средней скорости относительного движения составит три порядка (без учета разницы в массах нейтрона и иона ${}^3\text{He}$ -плазмы).

Тогда отношение скоростей реакций поглощения нейтронов (в единице объема) в плазме и бланкете составит $\sim 1/3$:

$$\frac{F_{\text{полг}}({}^3\text{He})}{F_{\text{полг}}({}^{208}\text{Pb})} = \frac{\sigma_{\text{пр}}({}^3\text{He}, 25 \text{ кэВ})}{\sigma_{\text{пг}}({}^{208}\text{Pb}, 0.025 \text{ эВ})} \cdot \frac{V_{\text{отн}}(25 \text{ кэВ})}{V_{\text{отн}}(0.025 \text{ эВ})} \cdot \frac{n_{\text{He3}}}{n_{\text{Pb208}}} \cdot \frac{n_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} \approx$$

$$\approx \frac{4.2 \text{ барн}}{2.3 \cdot 10^{-4} \text{ барн}} \cdot \frac{10^{+3}}{3^{1/2}} \cdot \frac{10^{+15}}{3 \cdot 10^{+22}} \cdot 1 \approx 0.35 .$$

Приближенная оценка показывает, что скорости поглощения нейтронов в плазме и в бланкете оказались ОДНОГО порядка. А поскольку поглощение нейтрона ядром ${}^3\text{He}$ приводит, главным образом, к ядерной реакции



то в плазме будет воспроизводиться тритий из гелия-3.

Поэтому можно сказать, что воспроизводство трития перемещается из бланкета (как это обычно рассматривается) в собственно объем плазмы и одновременно сообщается дополнительный ее нагрев. Это изменит схему топливного цикла реактора и сократит время жизненного цикла трития в установке. Тритий будет воспроизводиться в плазме, где и должен, в основном, быстро расходоваться.

Будет ли эта цепная реакция затухающей или самоподдерживающейся, зависит от размеров, структуры бланкета и свойств используемых материалов. Повидимому, может оказаться целесообразным рассматривать также и гибридный вариант термоядерной установки с добавлением в бланкет некоторого количества делящегося материала для усиления рассматриваемой цепной реакции. Присутствие в установке такого «чувствительного» элемента как термоядерная плазма может благоприятно отразиться на ее характеристиках безопасности.

Влияние нейтронов, генерируемых в плазме, на процессы, происходящие в ней, анализировалось в работе [7], но там рассматривалась не термоядерная плазма, а плазма эВ-диапазона энергии. При этом предполагалось, что плазма имеет сложный состав и содержит наряду с легкими нуклидами и тяжелые нуклиды (уран, плутоний, продукты деления). В этой концепции сложный состав плазмы в сочетании с тяжеловодным бланкетом определяет симбиозный нейтронный цикл синтеза и деления.

Рассматриваемая концепция термоядерной установки с (DT- ${}^3\text{He}$)-топливным циклом и с бланкетом, отличающимся экстремально малым поглощением нейтронов, может характеризоваться высокой плотностью нейтронов в бланкете [8]. Такой бланкет может оказаться привлекательным для трансмутации продуктов деления (даже без изотопного разделения), а также для быстрой трансмутации долгоживущих продуктов деления с малым сечением поглощения нейтронов (например, ${}^{135}\text{Cs}$, ${}^{126}\text{Sn}$ и др.), быстрая трансмутация которых не под силу даже реакторам на быстрых нейтронах и электроядерным установкам (ЭЛЯУ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках концепции использования ^3He , которая изначально связывалась с разработкой малонейтронного (D– ^3He)-цикла, рассмотренный (DT– ^3He)-топливный цикл со слабопоглощающим нейтроны бланкетом может обрести свою привлекательную противоположность, т.к. в нем могут генерироваться нейтроны, да еще и с размножением в цепной реакции синтеза (с участием нейтронов).

Литература

1. *Bell G.J., Glasstone S.* Nuclear Reactor Theory. – USA: Van Nostrand Reinhold Company. 1970.
2. *Rhodes R.* Dark sun. The making of the Hydrogen Bomb. – New York: Simon & Schuster Inc. 1995.
3. *Андрюшин И.А., Илькаев Р.И., Чернышев А.К.* Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2010.
4. *Андрюшин И.А., Илькаев Р.И., Чернышев А.К.* «Слойка» Сахарова. Путь гения. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2011.
5. *Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г.* Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. Учебник для вузов. – М.: МИФИ. 1999.
6. *Зимин С.А.* Некоторые нейтронно-физические параметры материалов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 1985. – Вып.3. – С.35–37.
7. *Ирдынчев Л.А., Киселев Г.В., Малофеев А.М., Труханов Г.Я.* Физические основы реактора ЯРДИС, совмещающего в стационарном режиме реакции деления и синтеза: Препринт ИАЭ-6709/1. Москва, 2012.
8. *Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G., Artisyuk V.V.* Feasibility study on high neutron flux ADS-system for RAW transmutation due to application of radiogenic lead / Abstracts of the tenth international topical meeting on nuclear applications of accelerators, Knoxville, TN USA, Apr. 3–11, 2011. Proceedings. – PP.318–324.

Поступила в редакцию 30.11.2014 г.

Авторы

Шмелев Анатолий Николаевич, доктор техн. наук, профессор

E-mail: shmelan@mail.ru

Куликов Геннадий Генрихович, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

UDC 621.039.6

ON THE PHYSICAL CONDITIONS FOR ARISING A CONTROLLED FUSION CHAIN REACTION SUPPORTED BY NEUTRONS IN FUSION FACILITIES WITH MAGNETIC PLASMA CONFINEMENT

Shmelyov A.N., Kulikov G.G.

NRNU MPhI. 31, Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

When nuclear reactors operate, a fission chain reaction (FCR) of heavy nuclei proceeds. In thermonuclear facilities with magnetic confinement of (DT)-plasma as a result of fusion reaction, along with the energy generation the neutrons are generated too. Due to the extremely low concentration of ions in the plasma compared with the concentration of atomic nuclei in the blanket a neutron balance in the facility is completely determined by the blanket physical properties.

The aim of the work is to create the physical conditions in which the rates of neutrons absorption in the plasma and in the blanket would be comparable. Such conditions could arise if, first, the plasma has a component with a large cross-section of neutron absorption (for example, ^3He , ^6Li and ^{10}B), and second, if materials of the blanket are characterized by record low neutron capture cross-section (e.g., ^{208}Pb , heavy water,

graphite). Thus, in general, a controlled fusion chain reaction supported by neutrons (FCRn) could also take place in the thermonuclear facility.

During implementation of the work a concept of suppressed neutron generation (D-³He)-cycle was used. To substantiate the idea suggested in the article, it is proposed to use (DT-³He)-fuel cycle facilities with low neutron absorption blanket.

We obtained the following results:

1. Unlike the suppressed neutron generation (D-³He)-fuel cycle, the (DT-³He)- fuel cycle considered here is profitable by its potential for generation of neutrons, i.e. the fact that there could be generated neutrons, which are also generated in FCRn.

2. Tritium breeding as a result of $n(^3\text{He},\text{T})^1\text{H}$ -reaction takes place in the plasma volume rather than in the blanket (as is usually the case). Tritium will be reproduced in the plasma, where it should be consumed, which will improve its use.

3. An additional heating of the plasma as a result of neutron absorption in the plasma is provided.

The fusion neutron source is considered to be the “richest”: neutron generation is accompanied by relatively small-scale energy processes. The thermonuclear facility with low neutron absorption blanket under consideration here could create a high density neutron flux in the blanket. It can be concluded from the above that such thermonuclear facilities could be used for fast transmutation of long-lived fission products with low neutron absorption cross-section, and perhaps even without their preliminary isotopic separation.

Key words: thermonuclear facility, blanket, neutron absorption cross-section, high density of neutron flux, transmutation.

REFERENCES

1. Bell G.J., Glasstone S. Nuclear Reactor Theory. – USA: Van Nostrand Reinhold Company. 1970.
2. Rhodes R. Darksun. The making of the Hydrogen Bomb. New York. Simon & Schuster Inc. 1995.
3. Andryushin I.A., Il'kaev R.I., Zhernyshov F.K. *Reshayuschij shag k miru. Vodородnaya bomba s atomnym obzhatiem RDS-37* [The decisive step towards peace. The hydrogen bomb with an atomic compression]. Sarov. FSUE «RFNC-VNIIEF» Publ., 2010 (in Russian).
4. Andryushin I.A., Il'kaev R.I., Zhernyshov A.K. «Slojka» Saharova. *Put' geniya* [«Puff» of Saharov. The path of Genius]. Sarov. FSUE «RFNC-VNIIEF» Publ., 2011 (in Russian).
5. Luk'yanov S.Yu., Koval'skij N.G. *Goryachaya plazma i upravlyaemyj yadernyj sintez. Uchebnik dlya vuzov* [Hot plasma and controlled nuclear fusion. Textbook for high schools]. Moscow, MEFHI Publ., 1999 (in Russian).
6. Zimin S.A. *Nekotorye nejtronno-fizicheskie parametry materialov* [Some neutron-physical parameters of materials]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Termoyaderyj sintez*. 1985, no. 3, pp. 35–37 (in Russian).
7. Irdyncheev L.A., Kiselev G.V., Malofeev A.M., Truhanov G.Ya. *Fizicheskie osnovy reaktora YaRDIS, sovmeschayuschego v stacionarnom rezhime reaktsii deleniya i sinteza*: Preprint IAE-6709/1 [Physical basis of the reactor YaRDIS, combining reactions of fission and fusion in a stationary regime: IAE Preprint-6709/1]. Moscow, IAE Publ., 2012 (in Russian).
8. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Apse V.A., Kulikov E.G., Artisyuk V.V. Feasibility study on high neutron flux ADS-system for RAW transmutation due to application of radiogenic lead / Abstracts of the tenth international topical meeting on nuclear applications of accelerators, Knoxville, TN USA, Apr. 3–11, 2011. Proceedings. – pp.318–324.

Authors

Shmelyov Anatoly Nikolaevich, Dr.Sci. (Engineering), Professor

E-mail: shmelan@mail.ru

Kulikov Gennadij Genrikhovich, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

E-mail: ggekulikov@mephi.ru