

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА, УПРАВЛЯЕМОГО УСКОРИТЕЛЕМ

В.В. Ганн

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина; E-mail: gann@kipt.kharkov.ua*

С помощью простых одномерных математических моделей описано поведение подкритической сборки нейтронного источника, управляемого импульсным пучком ускоренных электронов. Рассмотрены кинетические и релаксационные процессы в подкритической сборке. В рамках двухгруппового приближения получены распределения нейтронных полей, возбужденных внешним источником нейтронов. Проведены численные расчеты нестационарных распределений полей быстрых и тепловых нейтронов в подкритической сборке, возбуждаемой импульсным электронным пучком.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений повышения безопасности ядерных энергетических установок является использование подкритических ядерных реакторов, управляемых ускорителями. Наиболее экономичным считается использование ускорителей протонов с энергиями 1...1,7 ГэВ, которые могут порождать в нейтронопроизводящей мишени из Pb, W или U количество нейтронов, достаточное для поддержания работы реактора [1]. Основной проблемой при использовании протонных ускорителей является сильная активация оборудования и высокая стоимость ускоряющего комплекса. В связи с этим важно проверить основные принципы, заложенные в основу таких огромных по стоимости проектов, на установках, значительно меньших масштабов.

В последнее время активно обсуждаются возможности использования электронных ускорителей для создания нейтронных источников с подкритическими сборками, при этом показано, что до потоков 10^{17} нейтр./с это направление является более эффективным с точки зрения капитальных затрат [2]. Такая установка должна состоять из ускорителя электронов, системы транспортировки пучка к мишени, нейтронообразующей мишени и подкритической сборки из топливных элементов, замедлителя и отражателя нейтронов.

Основными механизмами образования нейтронов электронами с энергиями около 100...200 МэВ в тяжёлых ядрах являются фотоядерные реакции (γ, n), ($\gamma, 2n$) и т.д. и реакция фотоделения. Выход нейтронов на один ускоренный электрон на уране при этом близок к 0,1.

2. МОДЕЛЬ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ

Нами рассмотрена модель подкритической сборки, состоящей из центрального канала ввода ускоренного электронного пучка, мишени-конвертера, легководно-урановой топливной сборки и графитового отражателя (рис. 1).

На рис. 2 изображено поперечное сечение активной зоны [3]. Параметры сборки приведены в таблице.

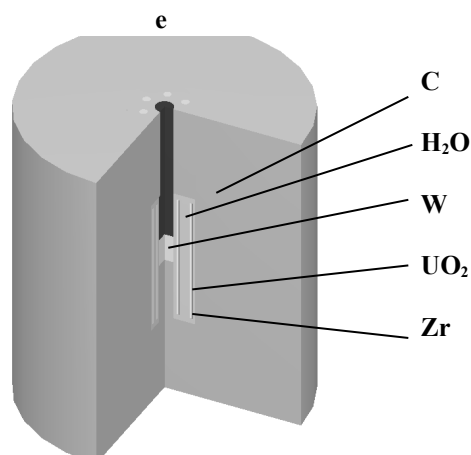


Рис. 1. Принципиальная схема подкритической сборки

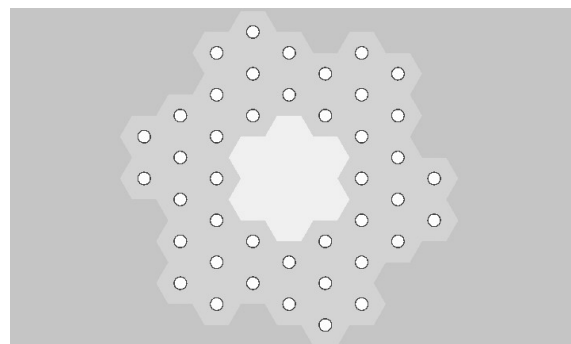


Рис. 2. Поперечное сечение активной зоны

Параметры сборки

Тип топлива	UO ₂
Обогащение по U-235, %	19,8
Плотность, г/см ³	10,96
Диаметр топливной таблетки, см	0,772
Толщина циркониевой оболочки, см	0,0722
Длина топливного стержня, см	45
Количество стержней	42
Шаг решетки, см	2,8

Было исследовано влияние уровня обогащения топлива на коэффициент размножения нейтронов в сборке k_{ef} . Результаты расчетов (рис. 3) показывают, что при увеличении обогащения топлива до 10 %

наблюдается быстрый рост k_{ef} , а затем рост существенно замедляется. Уменьшение обогащения с 80 до 20 % по влиянию на k_{ef} эквивалентно уменьшению объемной доли высокообогащенного топлива в 4,5 раза.

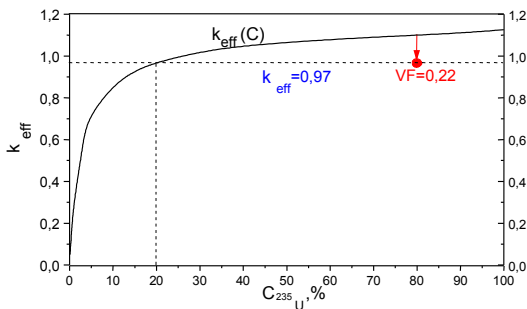


Рис. 3. Зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от обогащения топлива

3. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ИСТОЧНИКА

Для проведения нейтронно-физических расчетов нейтронного источника, начиная с проникновения электронного пучка в мишень-конвертер, генерации тормозных фотонов, образования фотонейтронов на ядрах мишени и заканчивая выходом быстрых нейтронов из мишени и их размножением в подкритической топливной сборке, необходимо использование больших современных комплексов ядерно-физических программ типа MCNPX. Однако работа таких программ требует больших вычислительных мощностей и подходит только для проведения окончательных расчетов. Существующие быстродействующие программы типа SCALE способны надежно проводить анализ системы на критичность, но они мало пригодны для проведения расчетов подкритических систем с внешним источником нейтронов.

Нами был разработан метод эквивалентного источника [4], пригодный для проведения предварительного отбора вариантов и оптимизации конструкции подкритической сборки с использованием быстродействующей программы SCALE 5, позволяющий получать приближенные данные относительно распределений нейтронных полей и тепловыделения для заданного внешнего источника нейтронов, сохраняя высокую точность в определении критичности сборки.

Идея метода состоит в замене нейтронообразующей мишени на дополнительную топливную кассету, превращении исходной подкритической сборки, возбуждаемой ускорителем, в эквивалентную критическую сборку с тем же энерговыделением и нейтронными потоками.

Распределение потока нейтронов в такой эквивалентной сборке будет совпадать с нейтронным потоком в исходной подкритической сборке, содержащей реальный источник нейтронов, а уровень мощности (и амплитуда нейтронного потока Φ_0) в эквивалентной сборке определяется из условия ее кри-

тичности: $k_{ef}^c(\Phi_0) = 1$.

Были проведены расчеты модельной подкритической сборки для заданного внешнего источника нейтронов с интенсивностью выхода нейтронов: $\dot{Y} = 2.2 \cdot 10^{14}$ нейтр./с, что соответствует облучению цилиндрической вольфрамовой мишени радиусом 1 см пучком электронов с энергией 100 МэВ при мощности 100 кВт.

На рис. 4 приведено распределение нейтронных потоков по высоте активной зоны в модельной сборке (см. рис. 1), рассчитанное методом эквивалентного источника. На рис. 5 изображено распределение нейтронных потоков по радиусу активной зоны.

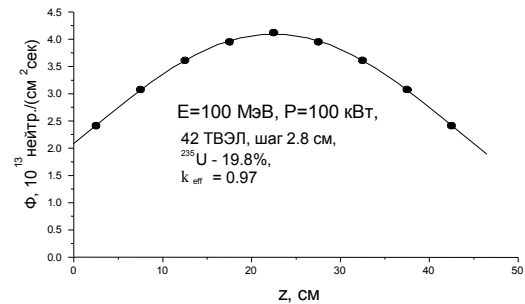


Рис. 4. Распределение нейтронного потока по высоте сборки

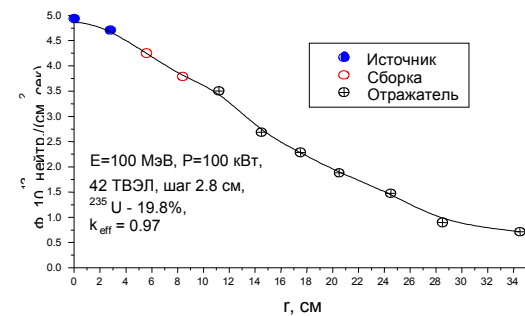


Рис. 5. Распределение нейтронного потока по радиусу сборки

Распределение энерговыделения в подкритической сборке по высоте твэла показано на рис. 6. Мощность, выделяемая подкритической сборкой, составила $W = 140$ кВт.

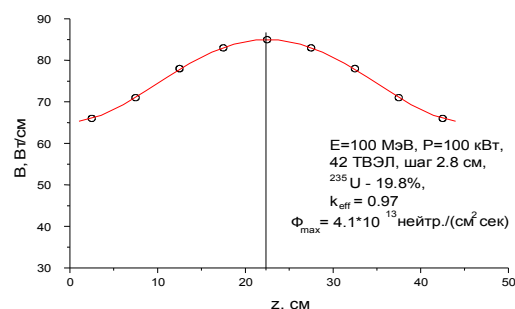


Рис. 6. Распределение энерговыделения по высоте твэла

Результаты расчетов, проведенных с помощью программы *SCALE 5* методом эквивалентного источника, хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных независимо с помощью разработанной в ХФТИ на базе пакета *GEANT 4* программы *RaT 3.0*, которая методом Монте-Карло моделирует процессы образования и транспорта нейтронов в облучаемой электронным пучком нейтронообразующей мишени и в подкритической сборке [5].

4. ОДНОМЕРНЫЕ МОДЕЛИ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ

Для установления основных закономерностей поведения нейтронных полей в подкритической сборке, управляемой ускорителем электронов, нами был рассмотрен ряд точно решаемых одномерных моделей подкритической сборки нейтронного источника.

Одномерная модель состоит из внешнего источника нейтронов размером $2a$, симметрично расположенных топливной сборки размером R и отражателя размером L (рис. 7). Уравнение для нейтронного потока $\Phi(x, t)$ в одностороннем приближении имеет вид:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = D \Phi''(x, t) - (\Sigma_a - \nu \Sigma_f) \Phi(x, t) + \dot{Q}(x, t), \quad (1)$$

где ν – средняя скорость нейтронов; D – коэффициент диффузии нейтронов; Σ_a – макроскопическое сечение поглощения, а Σ_f – макроскопическое сечение деления нейтронов в точке r ; $\dot{Q}(x, t)$ – плотность внешних источников нейтронов. Уравнение (1) допускает точное аналитическое решение.

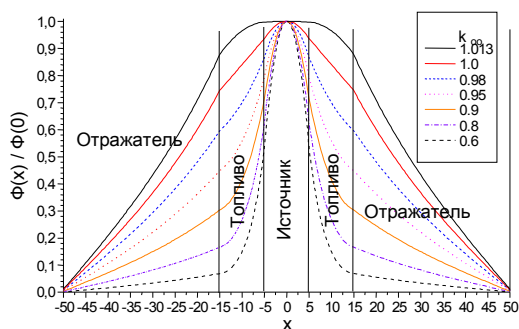


Рис. 7. Зависимость $\Phi(x)$ для различных значений параметра k_∞ .

На рис. 7 изображены распределения нейтронных потоков в подкритической сборке, возбуждаемые внешним источником нейтронов для различных значений параметра критичности $k_\infty = \nu \Sigma_f / \Sigma_a$.

Анализ полученных решений показывает, что существуют три различных режима работы подкритической системы: ближний подкритический, дальний подкритический и глубоко подкритический, кото-

рые существенно различаются по характеру распределения нейтронных потоков и по эффективности усиления внешнего нейтронного потока подкритической сборкой.

Рассмотрим одномерную модель нейтронного источника, в которой распространяются быстрые и тепловые нейтроны, с внешним источником размерами $2a$, испускающим быстрые нейтроны с интенсивностью \dot{Y} :

$$\frac{\partial F}{\partial t} = D_1 F''(x, t) + (\nu_1 \Sigma_{1f} - \Sigma_{1a} - \Sigma_{12}) F(x, t) + \nu_2 \Sigma_{2f} \Phi(x, t) + \dot{Q}(x, t); \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = D_2 \Phi''(x, t) - \Sigma_{2a} \Phi(x, t) + \Sigma_{12} F(x, t), \quad (3)$$

где $F(x, t)$ и $\Phi(x, t)$ – скалярные потоки быстрых и тепловых нейтронов, а Σ_{12} – макроскопическое сечение перехода быстрых нейтронов в тепловую группу. Использовались следующие значения параметров: $D_1 = 1.5$ см; $D_2 = 0.4$ см; $\Sigma_{1a} = 0.0085$ см⁻¹; $\Sigma_{2a} = 0.07$ см⁻¹; $\Sigma_{12} = 0.019$ см⁻¹; $\nu_1 \Sigma_{1f} = 0.005$ см⁻¹; $a = 5$ см; $\nu_1 = 10^9$ см/с; $\nu_2 = 2.2 \cdot 10^5$ см/с.

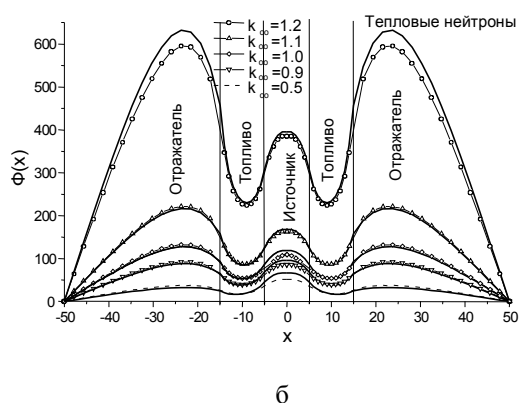
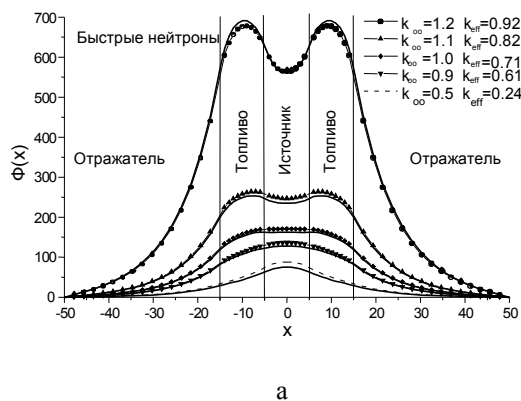


Рис. 8. Сравнение точных решений с решениями методом эквивалентного источника: а – быстрые нейтроны; б – тепловые нейтроны

Большая разница в значениях скоростей быстрых и тепловых нейтронов ν_1 и ν_2 приводит к тому, что в

такой системе сначала устанавливается равновесие в группе быстрых нейтронов при фиксированном распределении тепловых нейтронов, а затем происходит медленная релаксация тепловых нейтронов.

На рис. 8 изображены распределения нейтронных потоков быстрых и тепловых нейтронов в подкритической сборке, возбуждаемой внешним источником нейтронов для различных значений параметра критичности. Значения $k_{\infty} = 1.2$ и 1.1 соответствуют ближнему подкритическому режиму, а значения $k_{\infty} = 1.0$ и 0.9 – дальнему подкритическому режиму. На этих же рисунках проведено сопоставление точных решений с решениями, полученными методом эквивалентного источника. Заметное увеличение потока тепловых нейтронов в отражателе обусловлено малым значением сечения поглощения тепловых нейтронов в графите.

2. МОДЕЛИ СБОРКИ С ИМПУЛЬСНОЙ ВНЕШНЕЙ НАКАЧКОЙ

Реально существующие линейные ускорители электронов работают в импульсном режиме, поэтому интересно рассмотреть влияние импульсного характера внешнего источника нейтронов $\dot{Q}(x, t)$ на поведение нейтронных потоков со временем.

Усредняя обе части уравнения (1) по времени

$$D\bar{\Phi}''(x) - (\Sigma_a - \nu\Sigma_f)\bar{\Phi}(x) + \bar{Q}(x) = 0 \quad (4)$$

получим, что в данной модели средние значения нейтронных потоков при импульсном облучении подкритической сборки совпадают с распределением нейтронного потока при непрерывном облучении с той же средней интенсивностью.

Рассмотрим эволюцию во времени потока быстрых нейтронов. За время τ_1 после начала импульса устанавливается стационарное распределение потока быстрых нейтронов (см. рис. 8), затем происходит диффузионное рассасывание быстрых нейтронов из источника и их термализация, система выходит на фундаментальное решение и происходит совместная релаксация как быстрых, так и тепловых нейтронов.

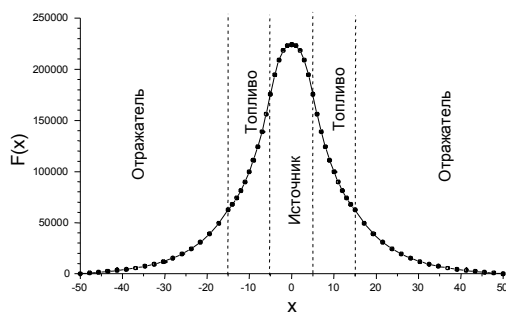


Рис. 9. Стационарное распределение потока быстрых нейтронов при $\tau_1 < t < \tau_i$

Характер дальнейшей зависимости нейтронных полей от времени существенно зависит от соотношения между временем релаксации тепловых нейтронов τ_2 и временем между импульсами T . В случае $T > \tau_2$ релаксация успевает завершиться в промежутке между импульсами. Рис. 10 и 11 позволяют представить динамику нейтронных потоков в этом случае.

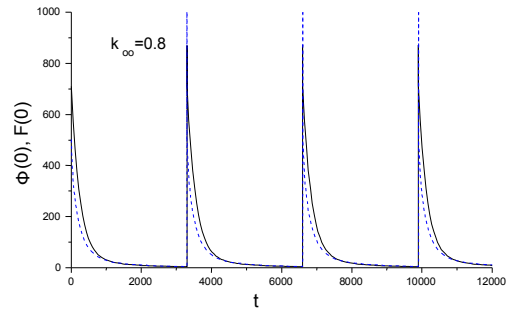


Рис. 10. Зависимость нейтронных потоков в центре мишени от времени в случае $T > \tau_2$: пунктир – быстрые нейтроны, сплошная линия – тепловые нейтроны

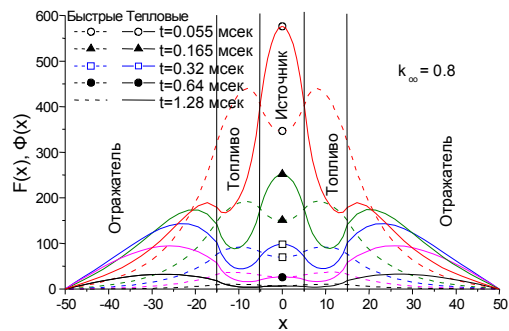


Рис. 11. Динамика нейтронных потоков в случае $T > \tau_2$

В случае $T < \tau_2$ в течение нескольких импульсов происходит постепенная накачка системы и выход ее на предельный цикл (рис. 12).

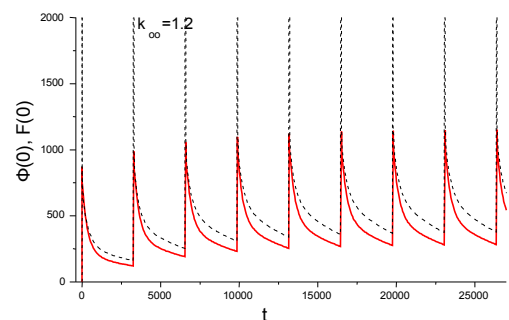


Рис. 12. Зависимость нейтронных потоков в центре мишени от времени в случае $T < \tau_2$

Динамика нейтронных потоков в предельном цикле в случае $T < \tau_2$ изображена на рис. 13. Из рис. 9 и 12 видно, что в двухгрупповой модели имеют место гигантские осцилляции потока быстрых нейтронов в области источника, в то время как осцилляции потока тепловых нейтронов распределены по сборке более равномерно (см. рис. 13).

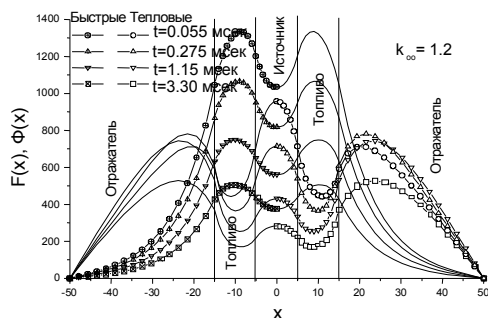


Рис. 13. Динамика нейтронных потоков в случае $T < \tau_2$

3. ВЫВОДЫ

1. Распределения нейтронных потоков в подкритической сборке с внешней накачкой и в режиме свободной релаксации (с выключенным источником) существенно различаются.

2. Существуют три различных подкритических режима работы системы: ближний подкритический, дальний подкритический и глубоко подкритический, которые существенно различаются по характеру распределения нейтронных потоков и по эффективности усиления внешнего нейтронного потока подкритической сборки.

3. Существует иерархия времён релаксации: сначала устанавливается равновесие в группе быстрых нейтронов при фиксированном распределении тепловых нейтронов; затем происходит торможение и термализация быстрых нейтронов и, наконец, медленная релаксация в системе тепловых нейтронов.

4. Усредненные значения нейтронных потоков при импульсном облучении подкритической сборки совпадают с распределениями нейтронного потока

при непрерывном облучении с той же средней интенсивностью.

5. Характер зависимости нейтронных потоков от времени существенно зависит от соотношения между частотой следования импульсов и обратным временем свободной релаксации системы.

6. Если период между импульсами T больше времени установления равновесия в системе тепловых нейтронов τ_2 , то система выходит на фундаментальное решение, и происходит совместная релаксация как быстрых, так и тепловых нейтронов.

7. В случае $T \ll \tau_2$ в течение нескольких импульсов происходит выход системы на предельный цикл.

8. В двухгрупповой модели имеют место гигантские осцилляции потока быстрых нейтронов в области источника и топлива и относительно небольшие осцилляции в области отражателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Carminati, R. Klapisch, J.P. Revol, Ch. Roche, J.A. Rubio, C. Rubbia. *An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator*. Geneva, 1993, 72 p. (CERN/AT/93-47 (ET)).
2. D. Ridikas, H. Safa, M.-L. Giacri. Conceptual Study Of Neutron Irradiator Driven By Electron Accelerator //7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product P&T (NEA/OCDE), Jeju, Korea, 14-16 Oct. 2002.
3. V.V. Gann, A.N. Dovbnya. Computer Modeling of Design for Neutron Source Subcritical Assembly //Proc. of Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Kharkiv, Feb. 24-25, 2005, p. 33-37.
4. В.В. Ганн, С.В. Дюльдя, М.И. Братченко. Моделирование нейтронных полей в управляемой ускорителем электронов подкритической сборке //Тез. докл. IV Конф. по физ. высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 27 февраля - 3 марта 2006 г. С. 55.
5. С.В. Дюльдя, М.И. Братченко, М.А. Скоробогатов. RaT — многоцелевая программа моделирования дозиметрических величин методом Монте-Карло //Тез. докл. IV Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, Харьков, 27 февраля - 3 марта 2006 г. С. 80.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НЕЙТРОННОГО ДЖЕРЕЛА, ЯКИЙ КЕРУЄТЬСЯ ПРИСКОРЮВАЧЕМ

В.В. Ганн

За допомогою спрощених одномірних математичних моделей описано поведінку підкритичної збірки нейтронного джерела, який керується імпульсним пучком прискорених електронів. Розглянуті кінетичні та релаксаційні процеси у підкритичній збірці. В рамках двохгрупового приближення отримані розподіли нейтронних полів, збуджених зовнішнім джерелом нейтронів. Проведені розрахунки нестационарних розподілів полів швидких та теплових нейтронів у підкритичній збірці, яка збуджується імпульсним електронним пучком.

MATHEMATICAL MODELS FOR ACCELERATOR DRIVEN NEUTRON SOURCE

V.V. Gann

Pulsed electron beam operational mode of accelerator driven subcritical assembly is described using exact solvable one-dimensional models. Kinetic and relaxation processes in subcritical assembly are investigated. Flux distribution for neutrons initiated by the external neutron source is obtained in the frame of two-group approximation. Numerical calculations for non-stationary distributions of fast and thermal neutron fluxes in the pulsed electron beam driven subcritical assembly were provided.