

Буданцева Ю.В. Учет эффекта Джоуля-Томсона в тепловых расчетах для участка магистрального газопровода // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2006. № 2/3 (20). С. 57-61.

Поступила в редколлегию 29.05.2008

**Пономарев Юрий Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по научно-исследовательским работам научно-исследовательского и проектного института транспорта газа. Научные интересы: теория, методологии и современные технологии разработки, внедрения и сопровождения корпоративных информационно-управляющих систем. Адрес: Украина, 61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16, тел. 730-57-12.

**Фролов Вадим Анатольевич**, заместитель директора «Объединенного диспетчерского управления» филиала ДК «Укртрансгаз». Научные интересы: современные технологии автоматизации интегрированных систем оперативно-диспетчерского управления для предприятий газотранспортной отрасли. Адрес: Украина, 01021, Киев, ул. Кловский спуск, 91, тел. 254-20-16.

**Борисенко Виктор Петрович**, канд. техн. наук, доцент, ученый секретарь Совета института, начальник отдела научно-исследовательского и проектного института транспорта газа. Научные интересы: теория, методологии и современные технологии разработки, внедрения и сопровождения корпоративных информационно-управляющих систем. Адрес: Украина, 61004, Харьков, ул. Маршала Конева, 16, тел. 730-57-70.

---

УДК 621.039.58

*Е.В. РУДЫЧЕВ, М.А. ХАЖМУРАДОВ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ДЛЯ НЕЙТРОПРОИЗВОДЯЩЕЙ МИШЕНИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

---

Методами математического моделирования исследуются спектральные характеристики материалов, которые могут использоваться в качестве нейтронопроизводящего конвертера в системе подкритической сборки, управляемой ускорителем электронов. Описываются полученные сравнительные характеристики спектров, определяющие эффективность использования урана, вольфрама и свинца в качестве материала нейтронопроизводящей мишени. Оценивается возможность оптимизации комплекса подкритическая сборка – мишень.

### **1. Введение**

Применение методов математического моделирования при помощи современных программных кодов [1], базирующихся на основе статистического метода Монте-Карло, позволяет проводить прямое моделирование сложных нейтронофизических установок с учетом реальной геометрии и физических процессов, проходящих при работе данных устройств. Это дает возможность осуществлять оптимизацию комплекса уже на этапе проектирования.

Наиболее важным влияющим фактором для современных нейтронофизических устройств, в частности для установки нейтронной дифракции или источника нейтронов, базирующейся на подкритической сборке, является спектральный состав нейтронов. При рассмотрении конкретной установки – системы подкритической ядерной сборки необходимо фиксировать коэффициент размножения нейтронов ( $k_{эфф}$ ). В России  $k_{эфф}$  для подкритической ядерной сборки принят равным 0,95, а в США – 0,98. В последних документах органов регулирования ядерной безопасности Российской Федерации рассматривается вопрос об увеличении  $k_{эфф}$  до 0,98. Это позволит увеличить мощность нейтронного потока сборки пропорционально мощности нейтронного потока нейтронопроизводящей мишени.

Цель исследования состоит в изучении методами компьютерного моделирования особенностей спектрального состава нейтронов для материалов урана, вольфрама и свинца, которые могут использоваться в качестве нейтронопроизводящего конвертера в системе подкритической сборки, управляемой ускорителем электронов. В дальнейшем возможно применение данных результатов для оптимизации технических характеристик соответствующих частей нейтронофизической установки.

Актуальность рассматриваемой задачи обусловлена ростом интереса к источникам нейтронов большой и средней мощности в мировом научном сообществе, а также возможностью оптимизации характеристик систем данного класса на стадии начального проектирования.

## 2. Математическое моделирование спектров нейтронов

При фиксированном значении коэффициента размножения мощность потока нейтронов будет линейна по отношению к мощности установки и, в идеальном случае, коэффициент усиления ( $K_{yc}$ ) можно получить по формуле

$$K_{yc} = \frac{1}{1 - k_{эфф}}, \quad (1)$$

где  $k_{эфф}$  – коэффициент размножения нейтронов. Следовательно, для  $k_{эфф}=0,95$  получаем  $K_{yc} = 20$ , а для  $k_{эфф}=0,98$  соответственно  $K_{yc} = 50$ . На практике  $K_{yc}$  имеет меньшие значения, поскольку вероятность того, что все нейтроны из нейтронопроизводящего конвертера примут участие в процессе деления в самой сборке, меньше 100%. Процессы деления нейтронов сильно зависят от энергии нейтронов, что следует из сечения [2] для реакции  $(n, f)$  (рис. 1).

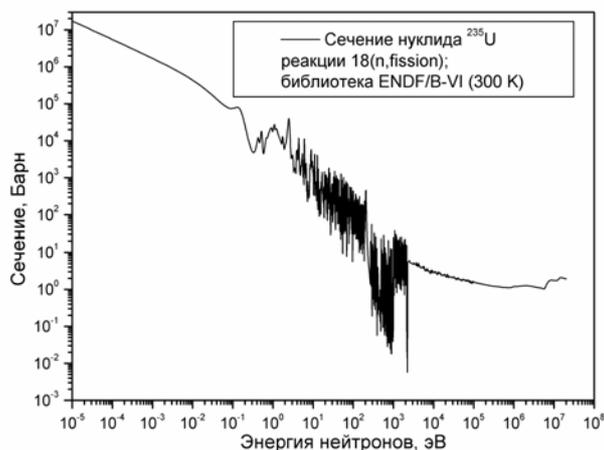


Рис. 1. Зависимость сечения деления для урана 235 от энергии нейтронов, библиотека ENDF/B-VI

дом Монте-Карло, реализованного на базе программного кода MCNPX [1]. Этот код является сертифицированным для нейтронофизических расчетов. В данном коде реализована новая концепция описания физических процессов, основанная на базе прямой интерполяции базы данных.

Были исследованы спектры нейтронов для вольфрама, свинца и урана. Форма мишени представляла собой цилиндр толщиной 10 см и радиусом 3,5 см. В целях возможности сравнения графиков спектры были нормированы на единичную площадь. При этом ширина канала (энергетического интервала) была равномерной на всем теоретически возможном диапазоне энергий 0-100 МэВ и фиксирована значением 30 кэВ. Среднее значение энергии в спектре рассчитывалось по формуле

$$\bar{E} = \frac{\sum_i \phi_i E_i}{\sum_i \phi_i}, \quad (2)$$

где  $\phi_i$  – поток (количество) нейтронов в  $i$ -ом канале;  $E_i$  – энергия соответствующего канала. Доля низкоэнергетических нейтронов (нейтроны ниже 30 кэВ) определяется по формуле

$$\eta_{low} = \left( \frac{\phi_1}{\sum_i \phi_i} \right) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\phi_1$  – поток (количество) нейтронов в первом канале нашего спектра.

Следовательно, спектральный состав нейтронопроизводящего конвертера играет определяющую роль в эффективности участия нейтронов в процессах деления. В связи с тем, что нейтронопроизводящий конвертер является массивной конструкцией, необходимо учитывать не только процессы фотоядерных реакций при генерации нейтронов, но и процессы транспортировки нейтронов в материале мишени. Поэтому спектральный состав мишени будет отличаться от фотоядерного спектра нейтронов для данного материала [3].

Спектральные зависимости нейтронов в результате фотоядерных процессов были получены при помощи математического моделирования мето-

На рис. 2 представлены спектры для вольфрама, урана и свинца соответственно.

Характеристики спектров для урановой, вольфрамовой и свинцовой мишеней, полученные по формулам (2) и (3), приведены в таблице.

Статистическая ошибка моделирования в интервале 30–3000 кэВ не превышала 7%. Наблюдаемые биения спектров, превышающие статистические ошибки, связаны, по-видимому, с резонансами в сечениях взаимодействий. Таким образом, существует возможность выделения необходимого спектрального состава при помощи соответствующих замедлителей и фильтров.

В зависимости от поставленной задачи можно использовать различные материалы мишени для получения нейтронов заданного спектрального состава.

Как видно из приведенных данных для этой геометрии мишени, средняя энергия спектра свинцовой мишени более чем на 40% больше, чем у вольфрама и урана. Кроме этого, форма данного спектра довольно хорошо согласуется со спектром испарения и экспериментальными данными [4], в которой исследовался спектр нейтронов от свинцовой цилиндрической мишени диаметром 5 см и толщиной, составляющей 3 радиационные длины (что для свинца соответствует 3,55 см) после облучения мишени электронами с энергией 45 МэВ.

Спектральные характеристики вольфрама и урана подтверждают тот факт, что для массивных мишеней применение спектра деления для расчетов не является полностью корректным, так как не принимаются во внимания эффекты нейтронного транспорта в мишени в случае достаточно больших сечений взаимодействий. На примере свинца видно, что необходимо увеличивать количество материала мишени для того, чтобы скомпенсировать разницу в сечениях взаимодействия для нейтронов (рис. 3), если мы хотим получить аналогичные спектральные характеристики для свинцовой мишени, по сравнению с мишенями из вольфрама и урана.

Данное предположение подтверждается при моделировании облучения более массивной мишени. В этом случае мы получаем изменение спектрального состава нейтронов, регистрируемых с поверхности мишени (рис. 4).

Характеристики модифицированного свинцового спектра следующие:  
 $\bar{E} = 1.373 \text{ МэВ}$ ,  $\eta_{low} = 0.912\%$ .

Таким образом, при одной и той же геометрии мишени (в случае свинца) получается более жесткий спектр нейтронов, совпадающий с экспериментальными данными [4]. При увеличении размеров свинцовой мишени спектр нейтронов приближается к спектрам, полученным для вольфрама и урана. В связи с этим планируется решить многокритериальную задачу оптимизации комплекса мишень – подкритическая сборка не только с учетом выхода нейтронов, но и с учетом их спектральных характеристик. Необходимо отметить, что при использовании

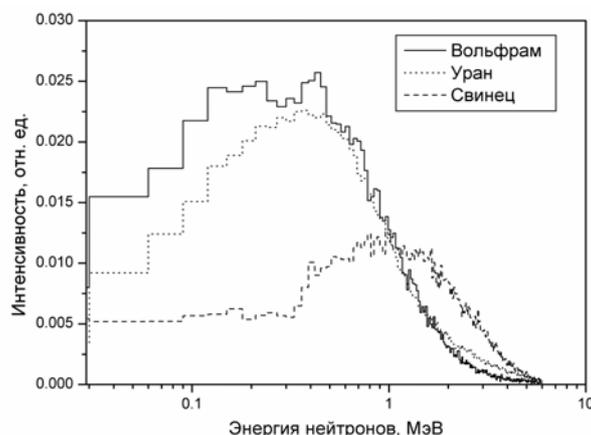


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов с поверхности вольфрамовой, урановой и свинцовой мишени

Материал мишени	$\bar{E}$ , МэВ	$\eta_{low}$ , %
Свинец	1,937	0,536
Вольфрам	1,112	0,787
Уран	1,351	0,334

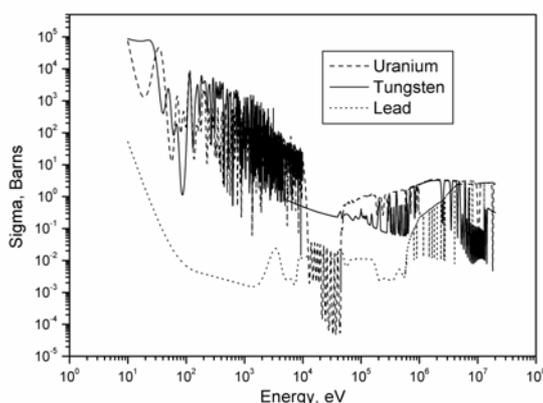


Рис. 3. Суммарное сечение для реакций  $(n, \gamma)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  в вольфраме, уране и свинце

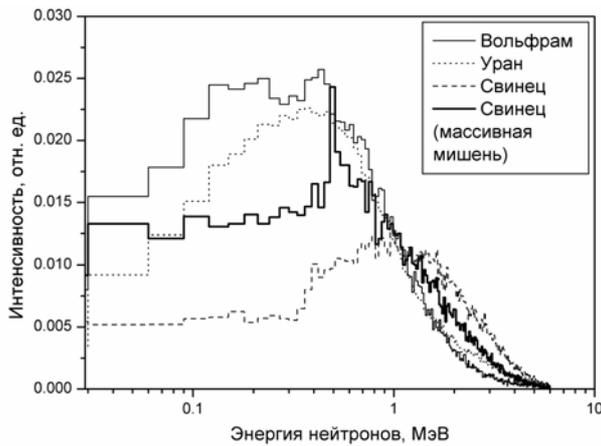


Рис. 4. Энергетический спектр нейтронов с поверхностей мишеней (в качестве массивной свинцовой мишени взяты 3 толщины и 20 радиусов обычной мишени)

подкритической сборки спектральные характеристики нейтронного потока сборки будут соответствовать спектру деления топлива, которое может применяться в сборке. Поэтому фактически оптимизация влияет только на первое поколение нейтронов. Спектральные характеристики нейтронов, получаемых прямо из электрон-нейтронного конвертера, имеют исключительное значение, так как непосредственно влияют на количество топлива, используемого в подкритической сборке при получении одной и той же интенсивности потока нейтронов. При применении различных материалов мишени и, если необходимо, в комплексе вместе с замедлителями можно варьировать количество делящегося материала при одном и том же коэффициенте размножения. Данная процедура позволит существенно снизить сто-

имость подкритической сборки за счет возможного уменьшения количества топлива и, следовательно, снизить стоимость всего комплекса в целом.

При фиксированном количестве делящегося материала можно увеличить поток нейтронов путем повышения эффективности поглощения сборкой выходящих из нейтронопроизводящей мишени нейтронов. Это достигается путем оптимизации нейтронного спектра мишени относительно сечения реакции деления для делящегося материала.

Параллельно возможно решить задачу оптимизации геометрии мишени. Некоторые аспекты влияния геометрических параметров мишени рассмотрены в работе [5].

### 3. Выводы

Проведено исследование особенностей спектральных распределений нейтронов в уране, свинце и вольфраме в результате фотоядерных реакций. Получены различия спектрального распределения нейтронов для урана, вольфрама и свинца при одной и той же геометрии мишени. Обнаружено, что при этих условиях спектр свинцовой мишени сдвигается в область высоких энергий по сравнению с вольфрамом и ураном, поэтому уменьшается эффективность работы комплекса конвертер – подкритическая сборка.

Показано, что для получения максимально эффективной установки необходимо оптимизировать спектры нейтронов по отношению к подкритической сборке. Данную оптимизацию можно провести на основе оптимального выбора геометрии мишени по критериям спектральный состав и выход нейтронов, или благодаря установке в зоне между мишенью и сборкой дополнительных замедлителей и фильтров. Из-за низкой теплопроводности и температуры плавления свинца не исключена возможность использования жидкой мишени. При достаточном теплоотборе это позволит обеспечить более высокую мощность пучка электронов и, следовательно, более высокую интенсивность выхода нейтронов из мишени. Таким образом, с использованием оптимизированной нейтронопроизводящей мишени при одном и том же расходе материала и при постоянном количестве топлива увеличивается выход нейтронов при эксплуатации подкритической сборки, что повышает эффективность работы и уменьшает стоимость установки.

*Практическая значимость.* Методы, изложенные в данной работе, можно применить не только к варианту моделирования подкритическихборок, но и к большому классу задач, где используются нейтроны в целях получения заданного спектрального состава и заданных количественных характеристик. Данные алгоритмы также применимы при расчете протонных взаимодействий с материалом, при расчете прямых нейтронных взаимодействий с материалом как в изотопных источниках, так и при взаимодействии нейтронов с конструкциями исследовательских ядерных реакторов. Все это дает возможность применять приведенные алгоритмы для широкого круга задач.

**Список литературы:** 1. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code / Ed. Briesmeister J.F. LA-13709-M. Los Alamos National Laboratory: Los Alamos, NM, 2000. 2. McLane V. ENDF-102 Data formats and procedures for the evaluated nuclear data file ENDF-6. Informal Report, No BNL-NCS-44945, Rev 01/04,

National Nuclear Data Center Brookhaven National Laboratory Upton, N.Y. 3. *Рудычев Е.В., Прохорец С.И., Хажмурадов М.А.* Исследование особенностей материалов для нейтронопроизводящей мишени // Радиоэлектроника и информатика. 2007. № 3. С. 27-31. 4. *Gayther D.B and Goode P.D., AERE, Harwel, Didcot, Berks.* Neutron energy spectra and angular distribution from targets bombarded by 45 MeV electrons // Nuclear Energy. 1967. Vol. 21. P. 733-747. 5. *Ayzatskiy M.I., Dovbnya A.M., Prokhorets I.M., Khazhmuradov M.A.* Mathematical modeling of the neutron production target of the Electron accelerator driven subcritical assembly // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. № 2 (46). P.28-30.

*Поступила в редколлегию 29.05.2008*

**Рудычев Егор Владимирович**, мл. научный сотрудник Национального Научного Центра Харьковского физико-технического института. Научные интересы: методы Монте-Карло, математическое моделирование. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-65-94. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

**Хажмурадов Манап Ахмадович**, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Национального Научного Центра Харьковского физико-технического института. Научные интересы: методы Монте-Карло, математическое моделирование, автоматизированные системы управления. Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46. e-mail: khazhm@kipt.kharkov.ua

---

УДК 006:621.643/.644.044.67

*И.В. ЛЕВЫКИН, Е.В. ЛОГВИНЕНКО*

## **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ENTERPRISE DYNAMICS РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

---

Рассматривается проблема внедрения систем управления полиграфическим производством на малых типографиях. Для реализации функциональных задач полиграфического производства используются инструментальные средства Enterprise Dynamics. В качестве практической реализации приводятся результаты реализации функциональных задач планирования, учета, контроля, анализа и регулирования технологического процесса изготовления печатного издания.

### **1. Постановка задачи**

В настоящее время наибольшее значение приобретает проблема управления полиграфическим производством. Однако помимо очевидных преимуществ, которые дает использование автоматизированных систем управления полиграфических предприятий (АСУПП), существуют и проблемы, возникающие прежде всего перед руководством небольших полиграфических предприятий. Одной из таких проблем является дороговизна отечественных и зарубежных АСУПП. Внедрение таких систем для малых предприятий, с учетом небольших объемов выпускаемой продукции, практически не рентабельно. Большинство АСУПП изначально рассчитаны на крупные, уже сформировавшиеся стабильные предприятия, и поэтому представляют собой комплекс, состоящий из множества модулей, не все из которых необходимы небольшим типографиям. Эксплуатация таких систем требует определенного количества квалифицированных специалистов, услуги которых, помимо самой системы, также требуют значительных средств [1].

Таким образом, возникла проблема поиска альтернативных решений, которые позволяли бы полностью или хотя бы частично реализовывать функциональные задачи таких АСУПП.

### **2. Описание используемого программного обеспечения**

В полиграфической отрасли Enterprise Dynamics может использоваться в качестве инструментального средства для реализации таких функциональных задач полиграфического производства, как: планирование, учет, контроль, анализ и регулирование. Enterprise Dynamics – инструментальное средство, предназначенное для объектно-ориентированного моделирования, которое позволяет моделировать, визуализировать и контролировать динамические процессы.

Оборудование, рабочие места и продукты могут быть представлены в Enterprise Dynamics при помощи соответствующих компонентов. ED позволяет пользователям создавать и в дальнейшем