

ний, на основе которых выполнены оценки долговечности.

По расчетам накопленное усталостное повреждение менее единицы, т.е. коэффициент запаса по напряжениям не превышает нормативное значение $n_\sigma = 2$ и, следовательно, вибропрочность обеспечена.

Таким образом, приведение случайного широкополосного процесса высокочастотного нагружения к гармоническому виду должно проводиться с учетом наклона кривой усталости в области числа циклов более 10^7 . Сравнение эквивалентных параметров нагружения, получаемых схематизацией реализации по методу теней и на основе статистического подхода, показало удовлетворительные результаты. Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в нормативных документах расчета на вибропрочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Европин С.В., Филатов В.М. Анализ долговечности элементов ядерных установок в условиях высокочастотного случайного нагружения. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 4, с. 209—214.
2. Горюнов О.В., Словцов С.В., Михайлов В.Е. и др. Обоснование вибропрочности трубопроводов АЭС. — Электрические станции, 2018, № 4, с. 2—7.
3. Шарый Н.В. Проблемы и методы обоснования вибропрочности оборудования РУ ВВЭР. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2012, № 32, с. 82—97.
4. Кузьменко В.А., Васинюк И.М., Крук Б.З. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения. Киев: Наукова думка, 1986. 264 с.
5. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
6. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
7. Горюнов О.В., Словцов С.В. Проблемы обоснования вибропрочности трубопроводов АЭС. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 142 с.
8. Горюнов О.В., Словцов С.В. Расчетно-экспериментальное обоснование вибропрочности трубопроводов АЭС на основе квазистатического подхода. — Надежность и безопасность энергетики, 2017, № 4, с. 304—309.

Поступила в Редакцию 27.01.23

УДК 621.039.531

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПУХАНИЯ СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОСЛЕРЕАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВЭЛОВ БН-600 И БОР-60

Забудько Л.М., Грачев А.Ф. (АО «Прорыв», г. Москва), Поролло С.И., Мариненко Е.Е. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск), Крюков Ф.Н., Беляева А.В. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград), Скупов М.В., Тарасов Б.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: zlm@proryv2020.ru

В активной зоне БН-600 завершено облучение 18 экспериментальных ТВС, содержащих твэлы со смешанным нитридным топливом с оболочками разной геометрии. В конце 2022 г. в АО «ГНЦ НИИАР» исследованы нитридные твэлы, облученные в составе 16 ЭТВС БН-600. Завершены также исследования четырех твэлов реактора БОР-60 со смешанным нитридным топливом с газовым подслоем в сборно-разборных облучательных устройствах ОУ-1, ОУ-2, трех твэлов с жидкометаллическим подслоем ОУ-4, извлеченных на разных этапах облучения [1]. Послереакторным исследованиям нитридных твэлов предшествовали претестовые расчеты их напряженно-деформированного и температурного состояния с учетом фактических

параметров облучения. Результаты послереакторных исследований сравнивали с расчетными данными [2].

Распухание облученного топлива является одним из наиболее важных факторов, который определяет степень термомеханического взаимодействия топлива и оболочки, ограничивающего работоспособность нитридных твэлов. В настоящей статье приводятся результаты обобщения и анализа полученных данных о распухании и скорости распухания смешанного нитридного топлива в твэлах с газовым подслоем.

Материалы, параметры облучения и методика исследования. Максимальное выгорание топлива исследованных образцов твэлов, облученных в БН-600, составило:

1,95—7,5% тяж. ат. в твэлах геометрии БН-600 с оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д., 2,6—7,5% тяж. ат. с оболочкой из стали ЭП823-Ш;

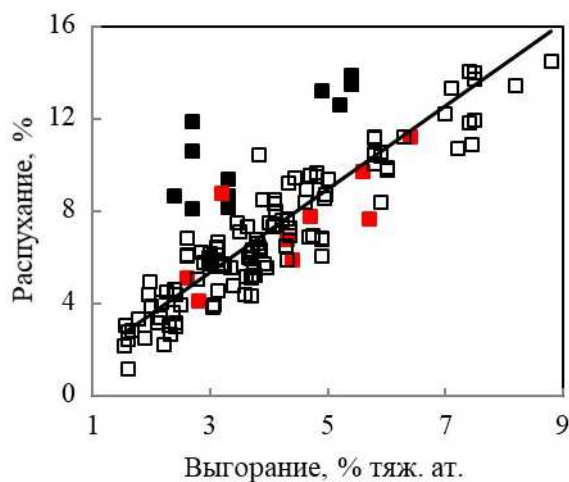
2,8—6% тяж. ат. в твэлах геометрии БН-1200 с оболочкой из стали ЭК164-ИД х.д.;

1,5—9% тяж. ат. в твэлах геометрии БРЕСТ с оболочкой из стали ЭП823-Ш.

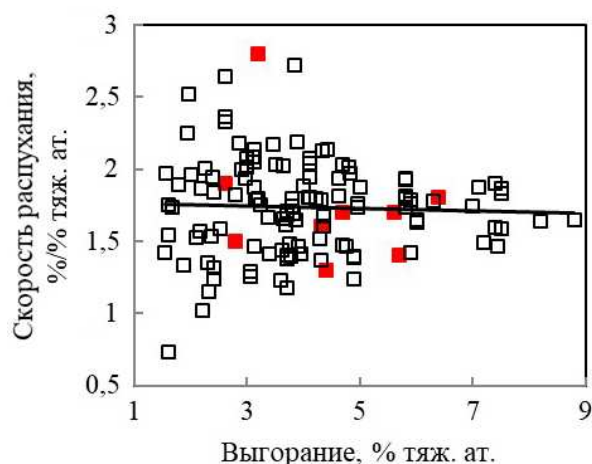
Максимальное выгорание топлива твэлов с оболочкой из стали ЭП823-Ш, облученных в реакторе БОР-60, составило 1,3—6,4% тяж. ат.

Измерения проводили методом гидростатического взвешивания образцов облученного топлива, вырезанных в нижнем, среднем и верхнем сечениях активной части твэла. Плотность определяли на аналитических весах Mettler Toledo XP-204 SE (Испания), оснащенных приставкой для измерения. В качестве рабочей жидкости использовали четыреххлористый углерод.

Экспериментальные результаты. Зависимость распухания смешанного нитридного топлива от выгорания твэлов экспериментальных сборок БН-600 и БОР-60 показана на рис. 1. В общем массиве выделяются данные комбинированной сборки КЭТВС-1 БН-600 с более высоким распуханием. Это связано с тем, что нитридные твэлы КЭТВС-1 имели в исходном состоянии увеличенный зазор между топливом и оболочкой — 0,15 мм по сравнению с 0,1 мм для твэлов остальных экспериментальныхборок. Согласно расчетам с помощью кода ДРАКОН-М 2.0 это приводит к увеличению максимальной температуры топлива на $\geq 150^\circ\text{C}$



Р и с. 1. Зависимость распухания нитридного уран-плутониевого топлива от выгорания после облучения твэлов в БН-600 (□), в том числе в составе КЭТВС-1 (■), твэлов БОР-60 (■)

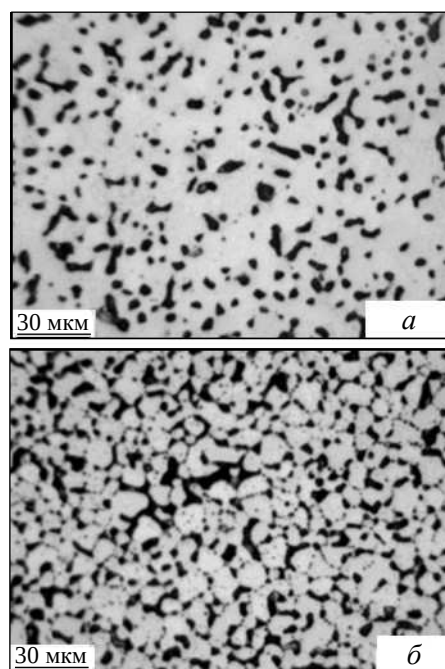


Р и с. 2. Зависимость средней скорости распухания нитридного уран-плутониевого топлива от выгорания после облучения в БН-600 без учета твэлов КЭТВС-1 (□), в БОР-60 (■)

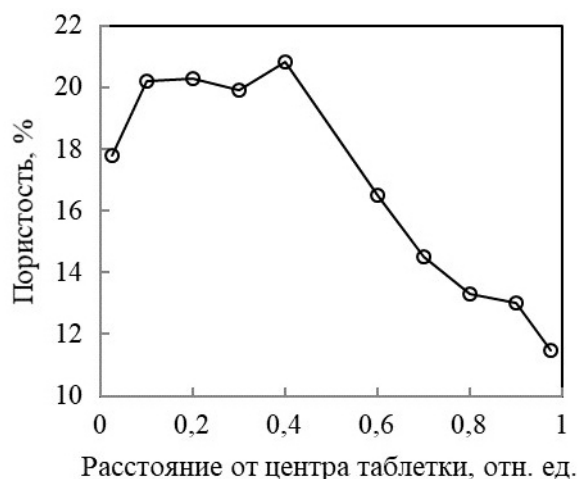
по сравнению с остальными исследованными твэлами [3].

Зависимость скорости распухания смешанного нитридного топлива от выгорания показана на рис. 2.

Обсуждение результатов. Согласно паспортным данным в исходном состоянии плотность таблеток смешанного нитрида исследованных твэлов составляла 84—87% теоретической, исходная технологическая пористость 13—16%, что подтверждается данными, полученными на образцах-свидетелях КЭТВС-6 (рис. 3, а). При облучении в структуре нитридного топлива



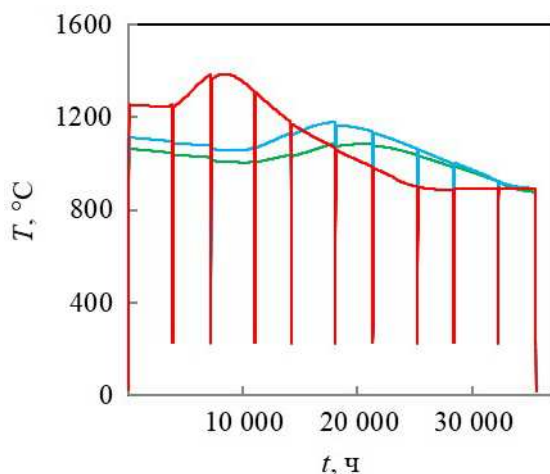
Р и с. 3. Микроструктура нитридного уран-плутониевого топлива до (а) и после облучения (б) в составе КЭТВС-6



Р и с. 4. Пористость нитридного уран-плутониевого топлива по радиусу топливной таблетки твэла КЭТВС-6

образуются как внутризеренные, так и зерно-границные поры (см. рис. 3, б). При этом характеристики образовавшейся пористости изменяются в зависимости от местоположения таблетки по высоте активной части твэла и по радиусу таблетки. В осевом направлении пористость изменяется в соответствии с аксиальным профилем выгорания топлива. Максимальная пористость, наблюдаемая в центральных областях таблеток, снижается к периферии (рис. 4). Такое неравномерное распухание связано, главным образом, с радиальным и аксиальным градиентом температуры топлива.

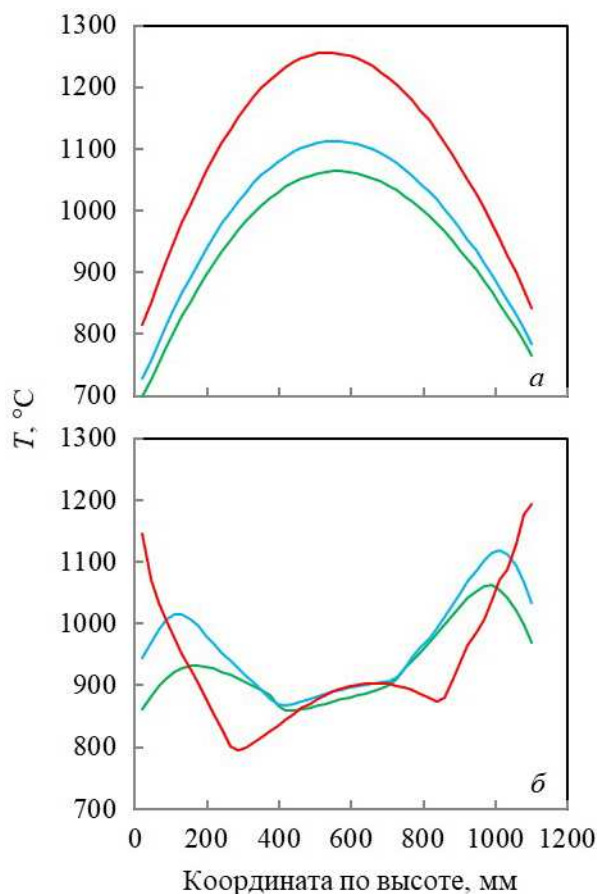
Сложность анализа данных заключается в том, что, кроме радиального и осевого градиента, при облучении температура топлива существенно изменяется с выгоранием. На рис. 5 на примере твэла ЭТВС-11 показана зави-



Р и с. 5. Зависимость максимальной температуры топлива в центральном сечении твэла ЭТВС-11 от времени, рассчитанная для максимального (—), номинального (—) и минимального зазора (—)

симость от времени максимальной температуры топлива в центральном сечении. Максимальное выгорание топлива в твэле составляло ~9% тяж. ат., максимальная повреждающая доза ~108 смещ./ат. [2]. В начале кампании максимальная температура наблюдается в центральной плоскости активной зоны. После установления номинального уровня мощности температура возрастает по мере облучения, достигает максимального значения и затем снижается. Характер осевого распределения температуры в начале кампании после выхода реактора на мощность зависит от распределения энерговыделения по высоте, в конце кампании — от распределения энерговыделения по высоте и осевого распределения размера зазора (рис. 6).

Расчет проведен с помощью кода ДРАКОН-М 2.0 для трех вариантов геометрии твэла с учетом допусков на диаметр топливной таблетки и оболочки — максимального, минимального и номинального зазора между топливом и оболочкой [3]. Кроме того, уже в начале



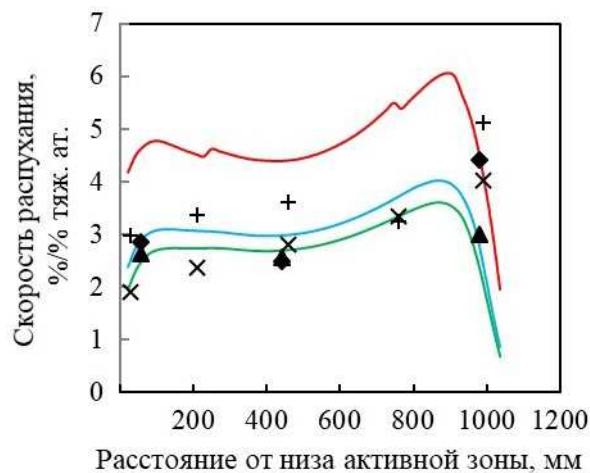
Р и с. 6. Аксиальное распределение температуры топлива в центре таблетки твэла ЭТВС-11 в начале (а) и конце кампании (б) для максимального (—), номинального (—) и минимального зазора (—)

облучения происходит растрескивание большинства топливных таблеток, что также влияет на их температурное состояние.

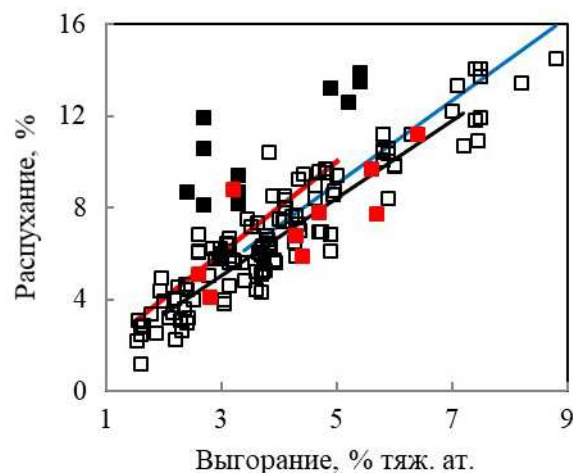
Таким образом, в дальнейшем при анализе данных можно определить лишь диапазон температуры, в котором топливо эксплуатируется. Как видно на рис. 1—3, экспериментальные данные имеют большой разброс. Из рис. 2 следует, что скорость распухания образцов топлива, вырезанных из разных частей по высоте активной части твэла, в пределах разброса данных почти одинакова и составляет $\sim 1,75 \pm 0,5\%$ на % тяж. ат. Причиной такого разброса, скорее всего, являются различия микроструктурных характеристик топлива: открытой и закрытой пористости, размера зерна и др. Большой разброс наблюдается также при измерении выхода газообразных продуктов деления и гелия под оболочку твэлов [4, 5]. Поскольку два этих процесса — распухание и выход газа тесно связаны, скорее всего, в том и в другом случае разброс обусловлен технологическими факторами.

Другой возможной причиной разброса данных являются различия в условиях облучения топлива. Анализ данных о распухании нитридного топлива в составе экспериментальных твэлов БН-600 показал, что имеются различия в скорости распухания образцов, вырезанных из разных сечений твэлов. Минимальную скорость распухания имеют образцы топлива, вырезанные из нижних сечений активной зоны твэлов, максимальная скорость наблюдается в верхних сечениях, где к концу облучения отмечается максимальная температура и сохраняется больший зазор между топливом и оболочкой для реализации более свободного распухания топлива, что наиболее явно проявилось в твэлах КЭТВС-1. На рис. 7 показано распределение по высоте двух твэлов КЭТВС-1 экспериментальной и расчетной с помощью кода ДРАКОН-М 2.0 скорости распухания нитридного топлива.

На рис. 8 показаны измеренное распухание нитридного топлива в зависимости от выгорания и аппроксимирующие функции для образцов, которые вырезаны из разных частей по высоте активной зоны (низ, середина и верх), отличавшихся температурой топлива. Как видно,



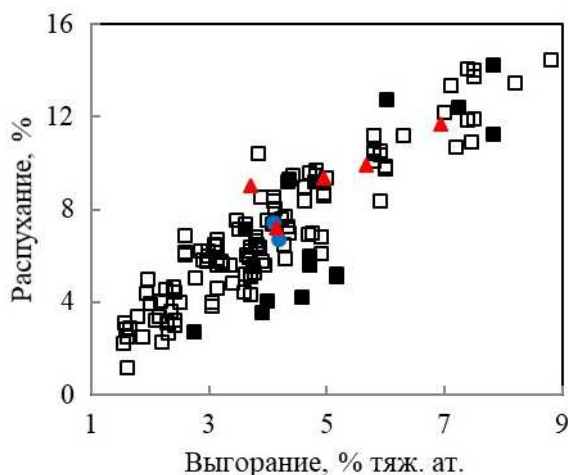
Р и с. 7. Скорость распухания нитридного уран-плутониевого топлива по результатам расчетов и послереакторных исследований твэлов КЭТВС-1 методами планиметрии (+, x) и гидростатики (♦, ▲) (обозначения кривых см. на рис. 5)



Р и с. 8. Зависимость распухания нитридного уран-плутониевого топлива от выгорания после облучения в БН-600 и БОР-60 в разных сечениях по высоте активной зоны: □, ■ — твэлы БН-600, в том числе КЭТВС-1 соответственно; ■, ■ — твэлы БОР-60; —, —, — — нижняя, средняя, верхняя часть соответственно

скорость распухания топлива в нижней части активной зоны меньше, чем в средней и верхней, в верхней части немного больше, чем в середине. Такие же результаты получены и для массива данных без твэлов КЭТВС-1.

Полученные результаты согласуются с известными данными. На рис. 9 показаны результаты сравнения (без учета твэлов КЭТВС-1) с ранее полученными после облучения твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом в быстрых реакторах «Феникс» (Франция) и «Дзёё» (Япония), штатных твэлов с нитридным урановым топливом БР-10.



Р и с. 9. Распухание нитридного топлива в БН-600 (□), «Феникс» (▲) [6], «Дзёё» (●) [7], БР-10 (■) [8]

Заключение. Измеренная с погрешностью $\pm 0,5\%/ \%$ тяж. ат. средняя скорость распухания смешанного нитридного уран-плутониевого топлива плотностью 84—87% теоретической, равная $\sim 1,75\%/ \%$ тяж. ат., может быть использована для экспресс-оценки этого топлива в условиях облучения твэлов типа БРЕСТ и БН-1200: номинальная температура в центре топливной таблетки на начальной стадии облучения $\sim 1175\text{—}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальное выгорание $\leq 9\%$ тяж. ат.

Анализ позволяет рассматривать массив данных о распухании уран-плутониевого нитрида как достаточно представительный и согласующийся с большинством ранее полученных отечественных и зарубежных. Это подтверждает возможность использования аналитической зависимости распухания нитридного топлива от выгорания, температуры, плотности, рекомендованной для инженерных топливных кодов [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адамов Е.О., Грачев А.Ф., Забудько Л.М. и др. Основные итоги выполнения комплексной программы расчетно-экспериментального обоснования твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом БН-1200 и БРЕСТ. — Атомная энергия, 2021, т. 131, вып. 5, с. 265—270.
2. Zabudko L.M., Grachev A.F., Zharebtsov A.A. e.a. Status on performance study of mixed nitride fuel pins of BREST reactor type. — Nucl. Engng Design, 2021, v. 384, 111430.
3. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of calculation modelling of nitride fuel performance: DRAKON code. — In: Intern. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). Yekaterinburg, 2017, Paper CN245-63.
4. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Скупов М.В. и др. Выход газообразных продуктов деления из облученного смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 2, с. 111—113.
5. Blank H. On the driving forces for bubble growth and swelling in MX-type fast breeder fuel. — J. Nucl. Mater., 1975, v. 58, p. 123—139.
6. Fromont M., Lamontagne J., Asou M. e.a. Behaviour of uranium-plutonium mixed nitride and carbide fuels irradiated in Phenix. — In: GLOBAL 2005 Intern. Conf. «Nuclear Energy Systems for Future Generation and Global Sustainability». Japan, 9—13 October 2005, № 329.
7. Tanaka K., Maeda K., Katsuyama K. e.a. Fission gas release and swelling in uranium-plutonium mixed nitride fuel. — J. Nucl. Mater., 2004, v. 327, p. 77—87.
8. Поролю С.И., Иванов С.Н., Мариненко Е.Е. и др. Анализ экспериментальных данных о газовой выделении и распухании облученного в БР-10 моноснитридного уранового топлива. — Атомная энергия, 2016, т. 121, вып. 6, с. 326—332.
9. Thomas J., Brozak D., Peddicord K. Material property and irradiation performance correlations for nitride fuels. — In: Transac. of 5th Symp. on Space Nuclear Power Systems. Albuquerque, 11—14 January 1988, p. 535—541.

Поступила в Редакцию 28.02.23

УДК 621.039.542.33:342

КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК ДИСИЛИЦИДА ТРИУРАНА

Карпюк Л.А., Кузнецов В.И., Новиков В.В., Михеев Е.Н., Федотов А.В.,
Лысиков А.В., Сивов Р.Б., Рысев Н.М., Бахтеев О.А., Лутков М.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: anvfedotov@bochvar.ru

Дисилицид триурана U_3Si_2 рассматривается в настоящее время в качестве топлива АСММ, что обусловлено его положительными характеристиками. Высокая теоретическая плотность по урану $11,58\text{ г/см}^3$ для тетрагональной фазы в

сравнении с $9,65\text{ г/см}^3$ для диоксида урана позволяет увеличить загрузку примерно на 20% по урану и примерно в 10 раз повысить теплопроводность в сравнении с диоксидом урана. Однако существенным недостатком является его