

<https://doi.org/10.26160/2572-4347-2022-16-86-88>

ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БЫСТРЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Окунев В.С.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: композитные материалы, металлокерамика, нанопорошок, уран, безопасность, аварийные режимы типа ATWS.

Аннотация. В статье анализируется возможность использования нового таблеточного топлива быстрых ядерных реакторов, основанного на смеси микрозерен керамики и нанопорошка металлического урана. Уран выполняет функции геттера свободного кислорода или азота, выходящего из керамических соединений плутония (оксид, нитрид). Нанопорошок, заполняя поры между микрозернами керамики, позволяет уменьшить пористость топлива и увеличить объем делящегося материала. Это ведет к повышению мощности реактора. Новое топливо характеризуется более высокой средней плотностью и теплопроводностью по сравнению с керамикой. Это способствует повышению самозащитенности реактора от тяжелых аварий.

NUCLEAR FUEL OF POWER FAST NUCLEAR REACTORS OF A NEW GENERATION BASED ON COMPOSITE MATERIALS

Okunev V.S.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: composite materials, cermets, nanopowder, uranium, safety, anticipated transient without scram.

Abstract. The article analyzes the possibility of using a new pellet fuel for fast nuclear reactors based on a mixture of ceramic micro grains and uranium metal nanopowder. Uranium acts as a getter for free oxygen or nitrogen coming out of plutonium ceramic compounds (oxide, nitride). The nanopowder, filling the pores between ceramic micro grains, makes it possible to reduce the porosity of the fuel and increase the volume of the fissile material. This leads to an increase in the power of the reactor. The new fuel is characterized by a higher average density and thermal conductivity compared to ceramics. This helps to increase the self-protection of the reactor from severe accidents.

Современный этап развития ядерной техники связан с повышением надежности и безопасности предприятий ядерного топливного цикла, включая АЭС. Быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем имеют наибольшие возможности в повышении безопасности (исключении аварий) в рамках существующих технологий. С этой целью ведется анализ возможности использования композитных материалов в составе конструкционных сталей и ядерного топлива. Металлокерамическое топливо на основе смеси $UO_{1,8}$ - Pu_4O_7 (реакторы с натриевым теплоносителем) или UN-PuN (реакторы с натриевым и свинцовым теплоносителем) выделяет кислород или азот, мигрирующий к оболочке и ускоряющий скорость коррозии внутренней поверхности оболочки.

Для связывания сводного кислорода используют геттер на основе микропорошка металлического урана в составе виброуплотненного топлива [1]. Однако при производстве такого топлива не удалось тщательно перемешать порошки керамики и металла, что привело к расслоению смеси при работе реактора БН-600 и повреждению оболочек твэлов. По этой причине целесообразно использовать таблеточное топливо, в котором смешан микропорошок керамики и нанопорошок металлического урана. Зароня поры между микрозернами, нанопорошок обогащенного урана способствует уменьшению пористости топлива с 25 до 5%. Это ведет к повышению мощности реактора на 40%. Повышается средняя плотность и теплопроводность топлива, что способствует снижению максимальных температур топлива в номинальных и аварийных режимах работы, включая режимы, сопровождающиеся отказом аварийной защиты (режимы ATWS) [2].

При использовании оксидного топлива роль доплеровского коэффициента реактивности в быстрых реакторах средней и большой мощности в разных аварийных режимах противоположна [3].

Например, для повышения самозащищенности от аварии с обесточиванием главных циркуляционных насосов первого контура, необходимо уменьшать по модулю отрицательный доплеровский коэффициент. В авариях с вводом положительно реактивности необходимо увеличивать по модулю этот коэффициент. В итоге добиться самозащищенности от всей совокупности аварий (включая режимы типа ATWS) невозможно. При использовании UN-PuN-топлива проблема смягчается, но остается не решенной. Ситуация обостряется в сложных комбинациях аварийных режимов ATWS (при наложении событий).

При использовании топлива на основе смеси микрозерен оксида и нанопорошка урана (до 40% по массе) поведение реактора в аварийных ситуациях подобно реактору с моноснитридным топливом. В идеальном случае нанопорошок металлического урана должен быть размещен в полостях между микрозернами керамики.

Наиболее предпочтительным для энергетических быстрых реакторов можно считать таблеточное топливо на основе смеси микрозерен UN-PuN и нанопорошка урана. В рамках малого объема таблетки легко контролировать равномерное перемешивание порошков. При использовании такого топлива реактор в режимах ATWS ведет себя подобно реактору с металлическим топливом. Роль доплеровского коэффициента реактивности одинакова во всех ситуациях. Легко обеспечить самозащищенность такого реактора от всех ситуаций типа ATWS, не исключенных детерминистически.

Обогащение урана в составе нанопорошка следует выбирать равным массовой доле делящихся нуклидов в микрозернах керамики. Начальная топливная загрузка реактора может не содержать плутоний и содержать только обогащенный уран. При работе реактора устанавливается равновесная концентрация нуклидов (включая делящиеся изотопы урана и плутония).

Максимально допустимая температура металлокерамического топлива на основе смеси микрорезерв UN-PuN и нанопорошка урана определяется температурой начала разложения нитрида (около 2000 К). В аварийных режимах АТWS возможно плавление нанопорошка. При этом герметичность оболочки не нарушается, а при переходе урана в жидкую фазу температура топлива несколько снижается.

Список литературы

1. Разработка и испытание твэлов быстрых реакторов с виброуплотненным оксидным топливом / А.А. Маершин, В.А. Цыканов, В.Н. Голованов и др. // Атомная энергия. 2001. Т. 91. Вып. 5. С. 378-385.
2. Okunev V.S. Fundamentally New Composite Materials of Fast Reactors Made on the Basis of Nanotechnology // Key Engineering Materials, 2021. Vol. 887, pp. 159-164; doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.
3. Khammel H, Okrent D. Reactivity Coefficients in Large Fast Power Reactors. Argonne National Laboratory: American Nuclear Society Publ.; 1970. 310 p.

References

1. Maershin A.A., Tsykanov V.A., Golovanov V.N. et al. Development and testing of fast reactor fuel elements with vibrocompacted oxide fuel // Atomic energy. 2001. Vol. 91, no. 5, pp. 378-385.
2. Okunev V.S. Fundamentally New Composite Materials of Fast Reactors Made on the Basis of Nanotechnology // Key Engineering Materials, 2021. Vol. 887, pp. 159-164; doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.
3. Khammel H, Okrent D. Reactivity Coefficients in Large Fast Power Reactors. Argonne National Laboratory: American Nuclear Society Publ.; 1970. 310 p.

Окунев Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры физики

Okunev Viacheslav Sergeevich — candidate of technical sciences, associate professor of the Department of physics

okunevvs@bmstu.ru

Received 20.04.2022