

ВНУТРИТВЭЛЬНАЯ КОРРОЗИЯ СТАЛЕЙ ЭК-164 И ЧС-68 БЫСТРОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА УРАНА

Е.А. Кинёв, В.С. Шихалёв, А.В. Барыбин

АО «ИРМ», г. Заречный Свердловской обл.



Аустенитная хромоникелевая сталь ЭК-164 является перспективным материалом для оболочек твэлов ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Важным аспектом ее работоспособности является физико-химическая совместимость с типичным ядерным топливом на основе таблеточного диоксида урана. Выполнены послереакторные исследования облученной комбинированной сборки с максимальным выгоранием 9,1 % т.а. и повреждающей дозой 77,3 сна, укомплектованной твэлами с оболочками из сталей ЧС-68 и ЭК-164 в холоднодеформированном состоянии. Используются методы гамма-сканирования, электропотенциальной резистометрии, оптической металлографии. По данным гамма-сканирования и резистометрии потенциальными участками развития коррозии оболочек являются высокотемпературные участки твэлов. Проведен сравнительный анализ внутритвэльной коррозии оболочек из сталей ЭК-164 и ЧС-68 по высоте активной зоны. В сечении максимума энерговыделения при температурах эксплуатации ниже 540 °С глубина коррозии стали ЧС-68 со стороны топлива не превысила 15 мкм. На аналогичных участках оболочки из стали ЭК-164 глубина внутренней коррозии составила 10 мкм. Максимум коррозионных повреждений обеих сталей зарегистрирован при температурах от 600 до 650 °С. Здесь глубина коррозионных повреждений в форме межкристаллитной и общей коррозии не превышает 20 мкм. Существенные отличия по механизму коррозии сталей не обнаружены. Отмечен факт локального усиления коррозии на стыках топливных таблеток и местах концентрации осколочного цезия. Напротив, в местах сужения остаточного зазора между топливом и оболочкой, где отсутствует цезий, коррозия стали ЭК-164 минимальна. Предельное утонение оболочек исследованных твэлов с максимальным выгоранием 9 % т.а. составило не более 5 % от исходной толщины.

Ключевые слова: твэл, оболочка, резистограмма, гамма-сканирование, металлография, коррозия.

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедческие исследования [1] оболочек твэлов комбинированной ТВС реактора БН600 с максимальным выгоранием 9,1 % т.а. и максимальной дозой 77,3 сна показали преимущество улучшенной [2] стали аустенитного класса 07X16N19M2Г2БТРхд (далее по тексту ЭК-164хд) перед штатным оболочным материалом 06X16N15M2Г2ТФРхд (далее сталь ЧС-68хд) по параметрам распухания и

© Е.А. Кинёв, В.С. Шихалёв, А.В. Барыбин, 2015

физико-механическим свойствам.

Другим важным аспектом обеспечения работоспособности твэлов энергетического реактора является физико-химическая совместимость оболочки с топливным сердечником таблеточного типа на основе диоксида урана [3].

В работе приведен обзор результатов сравнительных исследований внутритвэльной коррозии оболочек из сталей ЭК-164хд и ЧС-68хд твэлов ТВС. Условия облучения сталей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры эксплуатации комбинированной ТВС

Параметр	Значение
Температура Na на входе в реактор, °С	~370
Номинальная температура оболочки в сечении максимума энерговыделения, °С (ЧС-68хд / ЭК-164хд)	(506 – 534) / (509 – 538)
Номинальная температура оболочки на выходе из активной зоны, °С (ЧС-68хд / ЭК-164хд)	(615 – 646) / (617 – 648)
Выгорание максимальное, % т.а.	9,1
Максимальная повреждающая доза, сна	77,3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электропотенциальный контроль наружной поверхности облученных твэлов является одним из основных неразрушающих методов для оценки вкладов радиационного распухания, фазовых превращений, локальных дефектов и коррозии материала оболочек [4].

На рисунке 1 приведены резистограммы ряда исследованных твэлов комбинированной ТВС. Анализ центральных участков резистограмм (координаты от 0 до 700 мм) свидетельствует, что относительный рост электросопротивления оболочек прямо пропорционален степени радиационного распухания конструкционных материалов. Второй пик резистограмм (координаты от 700 до 1030 мм), ограниченный в высокотемпературной части твэлов верхним торцевым экраном (ВТЭ), является следствием утонения оболочек в результате внутритвэльной коррозии. Особенностью верхней части выбранных для сравнения твэлов является практически одинаковое значение прироста электросопротивления, не зависящее от материала и степени распухания сталей.

Данные резистометрии показывают, что в составе комбинированной ТВС уровень коррозии внутренней поверхности оболочек обоих типов близок: в центральной части твэлов он малозначителен, а с повышением температуры – возрастает.

Главной причиной высокотемпературной коррозии оболочек из аустенитных сталей (при $T_{\text{обол}} > 570$ °С) является наличие коррозионно-активных реагентов, в частности, летучих продуктов деления, среди которых наиболее опасен цезий [5]. Типичный характер его миграции на границу стыка активной части и ВТЭ твэла исследованной ТВС демонстрирует рис. 2а. Очевидно, что при таком перераспределении цезия в высокотемпературной зоне активной части существует потенциальная опасность усиления коррозии оболочечного материала со стороны топлива.

Особенностью приведенной спектрограммы является строгая периодичность (с шагом 10 мм) пиков скорости счета ^{137}Cs на участке 1100 – 1400 мм от низа твэла. Характер распределения слабомигрирующего продукта деления ^{106}Ru на соответствующем участке имеет инверсный вид – минимум скорости счета рутения соответствует максимуму цезия (рис. 2б). Такая зависимость является следствием совпадения шага сканирования со стыками топливных таблеток и предска-

зывает вероятность существования локальных очагов внутритвэльной коррозии металла на стыках таблеток при 500 °С и выше.

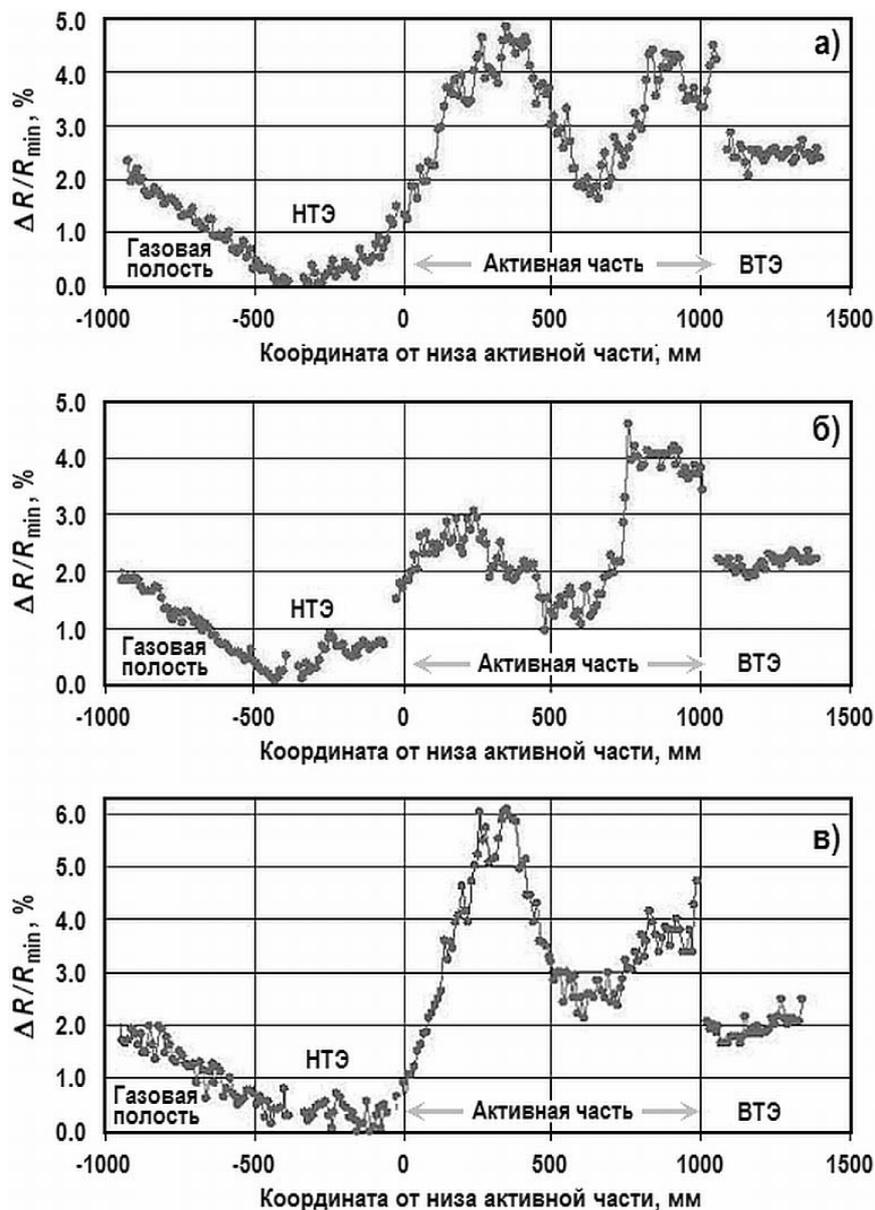


Рис. 1. Резистограммы твэлов: а) – оболочка из стали ЭК-164хд (максимальное распухание 4,9 %); б) – оболочка из стали ЭК-164хд (максимальное распухание 3,2%); в) – оболочка из стали ЧС-68хд (максимальное распухание 7,4 %)

Прямая оценка глубины коррозии оболочек комбинированной ТВС выполнена методом оптической металлографии. Установлено, что на участках ниже плоскости максимального энерговыделения (табл. 1) внутренняя поверхность твэлов, независимо от марки стали, подвержена исключительно межкристаллитной коррозии (МКК) на глубину от 10 до 15 мкм (рис. 3а). Признаков коррозионного растрескивания по границам зерен металла в условиях его умеренного радиационного распухания не наблюдается.

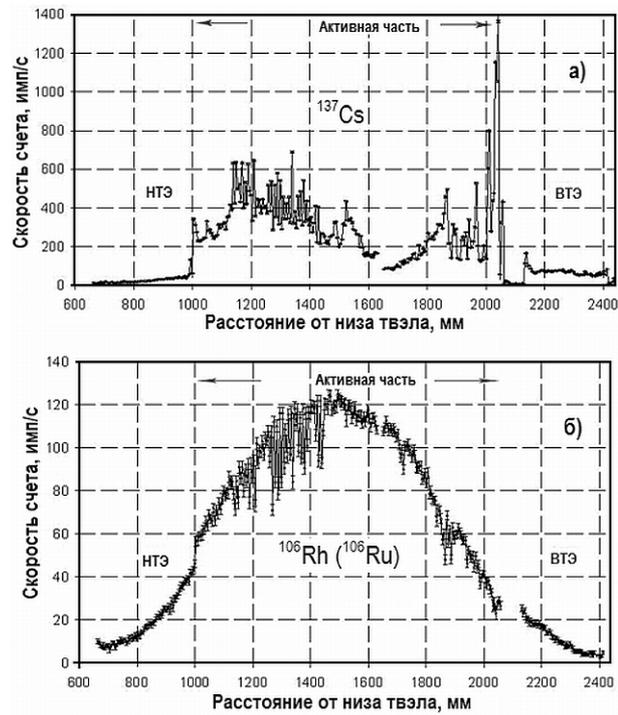


Рис. 2. Характер распределения продуктов деления по длине твэлов с таблеточным топливом (максимальное выгорание 9 % т.а.)

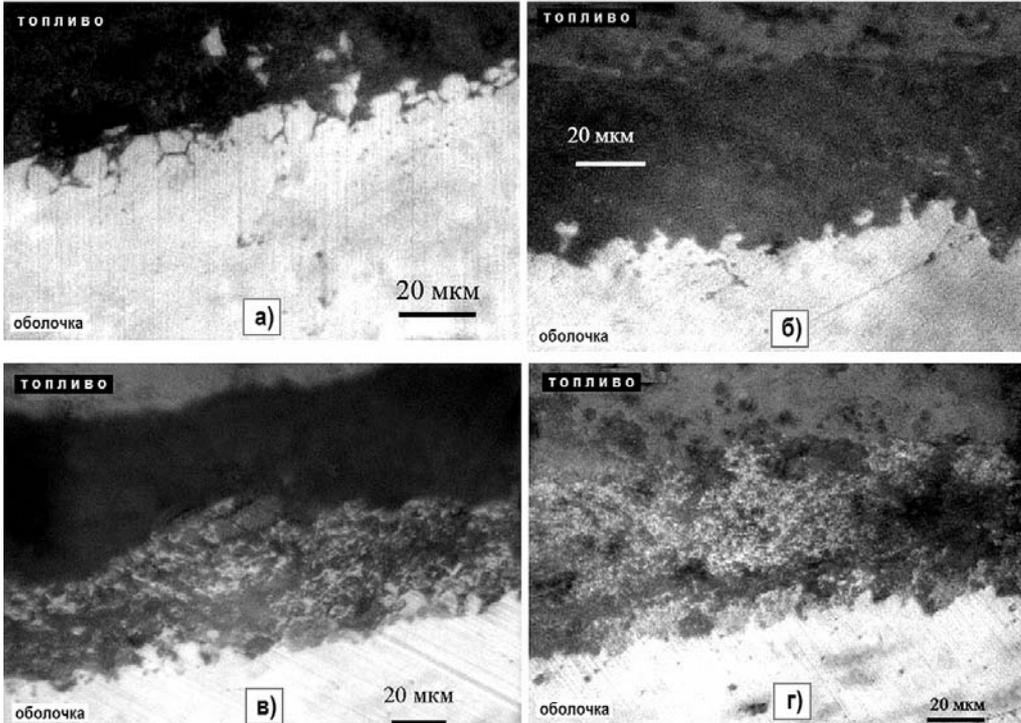


Рис. 3. Характер внутренней коррозии оболочек твэлов: а) – МКК в области центра активной части; б) – фронтальная коррозия вверху активной части (сталь ЧС-68хд); в) – фронтальная коррозия вверху активной части (твэл №101, сталь ЭК-164хд); г) – фронтальная коррозия вверху активной части (твэл №50, сталь ЭК-164хд)

Выше центра активной зоны в области температур 510 – 570 °С сталь ЧС-68хд в контакте с топливным сердечником испытывает комплексное воздействие МКК и фронтальной коррозии на глубину до 20 мкм, причем вклад фронтальной коррозии в утонение оболочки становится преобладающим (рис. 3б).

Внутренняя коррозия оболочек из стали ЭК-164хд в сечениях выше центра активной зоны изменяется немонотонно (рис. 4), оставаясь в целом ниже таковой для стали ЧС-68хд. Причинами нестабильного развития коррозии можно считать эффект концентрации агрессивных продуктов деления на стыках таблеток и сужение остаточного зазора «топливо-оболочка», реализуемое в условиях умеренного распухания улучшенной стали. Максимум физико-химического взаимодействия «топливо-оболочка» в твэлах на основе стали ЭК-164хд зарегистрирован вверху активной части. Здесь оболочка утоняется в результате фронтальной коррозии стали на глубину до 20 мкм (рис. 3вг, рис. 4).

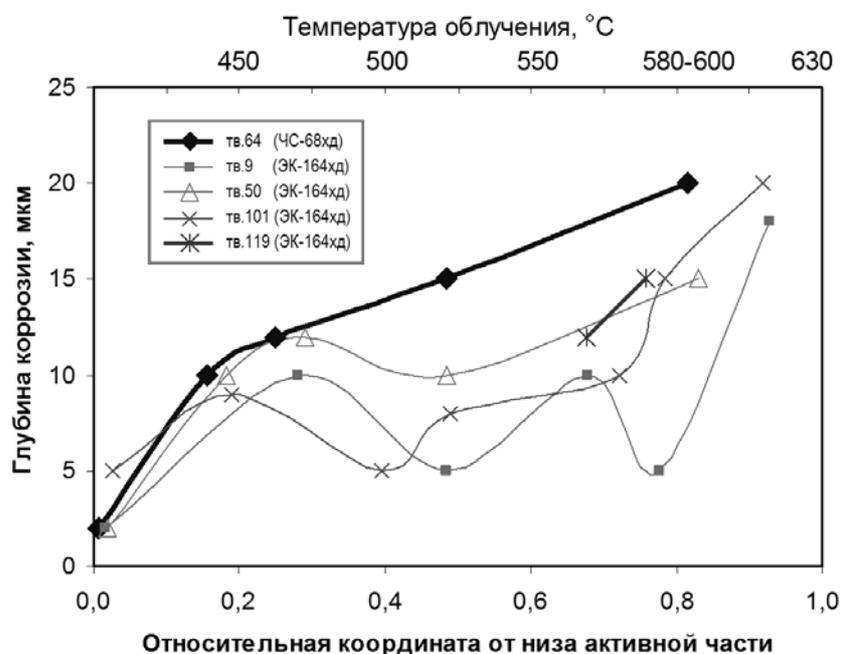


Рис. 4. Зависимость глубины внутритвэльной коррозии оболочек из сталей ЧС-68хд и ЭК164хд от положения в активной зоне реактора БН-600 (максимальные параметры 9,1 % т.а. и 77,3 сна)

Важной структурной чертой высокотемпературных сечений твэлов является технологический зазор шириной 60 – 80 мкм, заполненный продуктами деления топлива и коррозии оболочки. Судя по данным гамма-спектрометрии, основным компонентом этой смеси является цезий, который и является ответственным за фронтальное повреждение исследованных сталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительные исследования оболочек из сталей ЧС-68хд и ЭК164хд показали отсутствие существенных различий по механизмам и глубине внутритвэльной коррозии в условиях достигнутых параметров эксплуатации.

При максимальных повреждающих дозах ~77 сна и в интервале температур 500 – 580 °С коррозия внутренней поверхности оболочек из стали ЭК-164хд остается ниже, чем в стали ЧС-68хд.

Предельное утонение оболочек твэлов с максимальным выгоранием 9 % т.а.,

обусловленное фронтальной коррозией в контакте с цезийсодержащей внутритвэльной атмосферой при температурах 630 – 650 °С, составляет не более 5 % от исходной толщины независимо от состава исследованных конструкционных материалов.

Литература

1. Мосин А.М., Евсеев М.В., Портных И.А. и др. Изменение физико-механических свойств оболочек твэлов из сталей ЭК164 и ЧС68 после эксплуатации в реакторе БН-600 в течение четырех микрокампаний // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – Вып.1. – С. 224-230.
2. Митрофанова Н.М., Целищев А.В., Агеев В.С. и др. Конструкционные материалы для оболочек твэлов и чехлов ТВС реактора БН-600 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – Вып.1. – С. 211-223.
3. Кинёв Е.А. Внутритвэльная коррозия оболочек из нержавеющей стали в условиях реакторного облучения // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – Вып.2. – С. 107-113.
4. Щербаков Е.Н., Козлов А.В., Аверин С.А. и др. Использование электропотенциального контроля для оценки влияния технологических и эксплуатационных факторов на состояние оболочки твэлов БН-600 // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2007. – Вып. 1 (68-69). – С. 425-444.
5. Шамардин В.К., Крюков Ф.Н. Методы исследования и результаты экспериментов, моделирующих физико-химическое взаимодействие нержавеющей сталей с продуктами деления ядерного топлива – М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. – 31 с.

Поступила в редакцию 06.03.2015

Авторы

Кинёв Евгений Александрович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук
E-mail: kinev007@yandex.ru irm@irmatom.ru

Шихалёв Вячеслав Семёнович, ведущий специалист,
E-mail: irm@irmatom.ru

Барыбин Андрей Владимирович, ведущий специалист,
E-mail: irm@irmatom.ru

UDC 621.039.548.533

INNER FUEL ELEMENT CORROSION OF STEELS CHS68 AND EK164 AT FAST POWER REACTOR ON BASIS OF URANIUM DIOXIDE

Kinyov E.A., Shikhalyov V.S., Barybin A.V.

JSC «INSTITUTE OF NUCLEAR MATERIALS».
Zarechny, Sverdlovsk reg., 624250 Russia

ABSTRACT

The austenitic chromium-nickel steel EK164 is perspective material of the fast nuclear reactor rod cladding. The physical-chemical compatibility of this steel with typical pellet uranium dioxide nuclear fuel is important aspect for rod efficiency. The post reactor investigations of the combined rod assembling were carried out after peak burn-up 9,1 % FIFA and damage dose 77,3 dpa. There were rod claddings on basis of CHS68 and EK164 cold-worked steels to compose that assembling. The gamma-scanning, electrical-potential scanning and optical metallography methods was applied. The perilous regions of rod corrosion strengthening are high-temperature parts. This fact was previously established on basis of gamma-scanning and electrical-potential method data. The comparative analysis of the inner fuel rod corrosion for steel CHS68 and steel EK164 was carry out along core region height. The inner corrosion depth of steel CHS68 under contact with fuel has not exceeded 15 mm at the maximum power flux area by

temperature below 540 °C. The same rod corrosion of steel EK164 has come to 10 mm at the core region centre. The maximum of corrosion damage both steels has detected at the range from 600 to 650 °C. It is amount less than 20 mm by means of both frontal and intercrystalline corrosion type. Essential differences of corrosion mechanism both steels haven't disclosed. The fact of local intension corrosion was detected near the fuel pellet joints and places of fission fragment caesium accumulation. Contrariwise the corrosion of EK164 steel was minimum within narrow gap between cladding and fuel where the caesium is absent. The peak cladding thinning of examined fuel rods have formed less than 5 % of initial thickness under fuel burn-up 9 % FIFA.

Key words: fuel element, cladding, electrical resistivity graph, gamma nuclide graph, metallography, corrosion.

REFERENCES

1. Mosin A.M., Evseev M.V., Portnykh I.A., Sherbakov E.N., Shikhalev V.S., Mitrofanova N.M., Kozlov A.V. *Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svojstv obolochek tvelov iz stalej EK164 i CHS68 posle ekspluatatsii v reaktore BN-600 v techenie chetyrekh mikrokampanij* [Change of physical and mechanical property of pin cladding of EK164 and CHS68 steels after exploitation at reactor BN-600 during four microcampaign]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 1, pp. 224–230 (in Russian).
2. Mitrofanova N.M., Tselishev A.V., Ageev V.S., Budanov Yu.M., Ioltuhovskij A.G., Leonteva-Smirnova M.V., Reshetnikov F.G., Bibilashvili Yu.K., Shkabura I.A., Ivanov Yu.A. *Konstruktsionnye materialy dlya obolochek tvelov i chehlov TVS reaktora BN-600* [Construction materials of pin coverings and cases of the pile BN-600]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 1, pp. 211–223 (in Russian).
3. Kinyov E.A. *Vnutritvel'naya korrozija obolochek iz nerzhaveyuschej stali v usloviyah reaktornogo oblucheniya* [Inner fuel rod corrosion of stainless steel covering under conditions of pile irradiation]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2008, no. 2, pp. 107–113 (in Russian).
4. Sherbakov E.N., Kozlov A.V., Averin S.A., Shikhalev V.S., Yagovitin P.I., Isakov A.P., Kuzevanov A.A., Ershova O.V. *Ispol'zovanie elektropotentsial'nogo kontrolya dlya otsenki vliyaniya tekhnologicheskikh i ekspluatatsionnykh faktorov na sostoyanie obolochki tvelov BN600* [Using of electropotential control for influence estimation of technological and operational factors to state of BN-600 pin cladding]. *VANT. Materialovedenie i novye materialy*. 2007, no. 1 (68-69), pp. 425-444 (in Russian).
5. Shamardin V.K., Kryukov F.N. *Metody issledovaniya i rezultaty eksperimentov, modeliruyuschiy fiziko-himicheskoe vzaimodejstvie nerzhaveyuschiy stalej s produktami deleniya yadernogo topliva* [Examination methods and experiment results which model the physical-chemical interaction of stainless steel with nuclear fuel fission products]. Moscow, CNIIAtominform Publ., 1989. 31 p.

Authors

Kinyov Evgenij Aleksandrovich, Leading Research Assistant, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: kinev007@yandex.ru irm@irmatom.ru

Shihalyov Vyacheslav Semyonovich, Senior Staff

E-mail: irm@irmatom.ru

Barybin Andrej Vladimirovich, Senior staff

E-mail: irm@irmatom.ru