

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММЫ МУЗА ДЛЯ РАСЧЕТНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРАХ

А. В. Алексеев

ОАО ГНЦ НИИАР, 433510, г. Димитровград-10 Ульяновской обл.

Приводится описание моделей математической программы МУЗА, применяемой для расчетов испытываемых в исследовательском реакторе МИР твэлов, а также сравнения экспериментальных и расчетных результатов для твэлов ВВЭР.

Ключевые слова: расчет, эксперимент, твэл, ВВЭР, исследовательский реактор, математическая программа МУЗА.

MUZA CODE EMPLOYED FOR CALCULATION SUPPORT OF EXPERIMENTS IN RESEARCH REACTORS / A. V. ALEKSEEV // MUZA code models applied for calculation of fuel element tests in MIR research reactor are described, as well as experimental and calculation results for water-moderated water-cooled power reactor (WWPR) fuel elements are compared.

Key words: calculation, experiment, fuel element, WWPR, research reactor, MUZA code

1. Описание программы МУЗА

Программа МУЗА [1] – это интегральная программа, предназначенная для теплогидравлических расчетов экспериментальных устройств и твэлов. Она применяется также для расчетов твэлов, испытываемых в реакторе МИР. Испытания, в которых использовалась программа, моделировали:

– аварию с вводом положительной реактивности (RIA) ВВЭР [2];

– кризис теплообмена в пучке твэлов ВВЭР-1000 в стационарном и импульсном (RIA) режимах;

– стационарные и переходные явления в пучках твэлов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, оснащенных топливными термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) и содержащих твэлы с выгоранием до 70 МВт-сут/кгU;

– стационарные явления в разных сборках твэлов, ориентированные на расчеты распределения расхода теплоносителя по экспериментальным устройствам со сложной геометрией;

– извлечение твэлов и пучков твэлов на воздух из реактора или бассейна выдержки.

В исследованиях динамических режимов теплоносителя при большом паросодержании исполь-

зуется программа КОРСАР (версия 1) [3], которая позволяет добавлять к себе модели пользователя. Одной из таких моделей является модель расчета твэлов в программе МУЗА. Разработанная кросс-версия МУЗА-КОРСАР позволяет использовать модели расчета твэлов МУЗА при расчете теплоносителя по моделям КОРСАР. В частности, это нужно для экспериментов RIA с кризисом теплообмена.

Программа МУЗА имеет базу данных, включающую:

– свойства воды и пара;

– свойства 45 материалов, 10 из которых газы;

– учет плотности критического теплового потока (Q_c) для различных форм проходного сечения канала на основе каркасных таблиц. Для треугольного пучка база данных обновлена на основе материалов 2011 г. [4], учитывающих неравномерность линейной мощности (ЛМ) по длине [5].

Практически произвольная расчетная схема строится из элементов, каналов и источников теплоносителя. Элементы служат для моделирования твердотельных деталей в одно- и двухмерной геометрии, каналы – для моделирования теплоносителя. Элемент может иметь разные материалы в разных расчетных сечениях и произвольное положение относительно канала. Положение эле-

мента относительно канала задается не по ячейкам, как, например, в коде КОРСАР (версии 1), а по координатам, что облегчает изменение количества расчетных ячеек элемента и канала. Для стыковки температуры и передаваемой мощности между элементом и каналом производится интерполяция по длине, что снижает погрешности, особенно при существенной неравномерности энерговыделения по длине, характерной для исследовательских реакторов.

Для задания параметров используют 1–3-мерные функции (1D-, 2D-, 3D-таблицы зависимости от координат, времени или температуры).

Теплоносителем в каналах могут быть вода (пар) или газы.

Модели программы МУЗА для теплофизического расчета (необязательные модели помечены звездочкой):

- **материалы*** (теплофизические и механические свойства материалов в зависимости от температуры и выгорания. Пользователь может корректировать свойства и добавлять материалы. В случае UO_2 учитывается выгорание до 80 МВт·сут/кгU, гладкая интерполяция по температуре и выгоранию);

- **теплофизические свойства газовых смесей***;

- **функции*** (1D-, 2D- и 3D-функции – независимые объекты расчета);

- **массивы материалов и удельных энерговыделений** (каждый массив может быть использован несколькими элементами);

- **элементы:**

- одно- или двумерный расчет распределения температуры по объему элементов;

- распределение удельного энерговыделения единицы объема Q_v или длины Q_L как 1D-, 2D- или 3D-функция координат и времени с учетом деформации. Для отдельных материалов может задаваться множитель Q_v (например, для газов он равен 0 в случае сложной конфигурации при деформации). Имеется несколько способов нормировки энерговыделения. Имеется отдельная модель для остаточного энерговыделения;

- теплофизические свойства материалов, для газовых полостей могут быть рассчитаны и записаны в отдельный файл свойств газовых смесей;

- плотность критического теплового потока;
- граничные условия трех родов (для третьего рода могут использоваться данные программы КОРСАР);

- коэффициенты теплоотдачи относительно теплоносителя (α), газовых зазоров твэлов

с большим выгоранием топлива, в том числе, некоторые модели для расчета охлаждения твэлов ВВЭР при сверхкритическом давлении (СКД);

- в отдельных расчетных слоях по длине (z) или толщине (радиусу) можно задать теплопроводность или коэффициент теплопередачи (например, между таблетками топлива) (*);

- газовые полости внутри элемента (*);

- выход газовых продуктов деления (ГПД) из топлива под оболочку твэлов ВВЭР с выгоранием до 60 МВт·сут/кгU с расчетом давления и состава газа под оболочкой твэла (учитываются только долгоживущие и стабильные изотопы) (*);

- датчик давления с пружинным элементом (дифференциальным) в твэле с учетом температурного расширения деталей и давления в полостях (*);

- тепловое расширение и упругая деформация, вызванная распуханием и нагружением (упрощенная модель толстого цилиндра) (*);

- взаимное облучение элементов (*);

- расчет температуры твэла ВВЭР в режиме скачка мощности (*);

- среднерадialная энтальпия расчетных зон (для реактивной аварии);

- **каналы***:

- энергия (энтальпия и температура), расход и давление в 1D-приближении;

- разные типы проходного сечения канала (труба, пучок, кольцо, «большой объем»);

- гидравлические сопротивления разного типа.

- **управление расчетом*** (опции для управления расчетом стационарного и нестационарных состояний. Например, шаг увеличения мощности элементов (доля мощности) в итерациях расчета стационарного состояния);

- **тестирование моделей*** (тестирование отдельных моделей, например, плотности критического теплового потока, при этом результаты выдаются в виде таблицы в зависимости от двух заданных параметров. Общее число входных параметров зависит от модели).

База данных программы включает теплофизические и механические (для упругой области) свойства материалов, каркасные таблицы Q_C в зависимости от давления, массовой скорости и относительной энтальпии.

С помощью функций можно менять значения или множители следующих параметров: Q_C , граничной относительной энтальпии (для кризиса второго рода), α теплоносителя и газовых зазоров, гидравлического диаметра D_g элементов и каналов, распределения выгорания по объему элемента.

При работе кросс-версии по моделям программы КОРСАР рассчитываются канал и твэл, определяются температура теплоносителя и коэффициент теплоотдачи (граничные условия) для расчета твэла по модели программы МУЗА.

Расчет по программе МУЗА не влияет на результаты расчета по программе КОРСАР.

2. Примеры сравнений измеренной и рассчитанной температуры центра топливного сердечника

Приведем результаты расчетов следующих испытаний:

– твэлов ВВЭР-440 с выгоранием 51 МВт-сут/кгU в режиме циклирования мощности [6];

– твэлов ВВЭР-440 с выгоранием 50 МВт-сут/кгU в режиме скачков мощности [7];

– твэлов ВВЭР-1000 с выгоранием 59 МВт-сут/кгU в режиме RIA [2].

2.1. Испытание в реакторе МИР рефабрикованных твэлов (РТ) из отработавшей ТВС ВВЭР-440 в режиме циклирования мощности [6]

Данные эксперименты выполнены для определения выхода ГПД и температуры центра топливного сердечника в процессе циклического изменения мощности. Выход газа измерен на одном твэле, тогда как температура – на двух других. Все три твэла работали в одной сборке. Результаты измерений (исходные данные) – динамика выхода ГПД, температуры ТЭП и ЛМ – приведены на рис. 1 и в табл. 1. Расчеты проводились для 40 моментов времени.

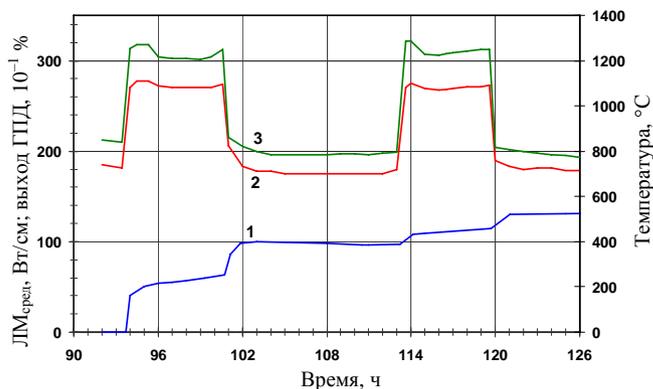


Рис. 1. Зависимость от времени выхода ГПД (1), средней ЛМ (2), температуры ТЭП (3)

Исходные данные расчета в режиме циклирования мощности

Параметр	Значение	
Время начала и конца расчетов (отсчитывается от момента выхода твэла на мощность), ч	92–126	
Длина топливного сердечника, м	0,4	
Диаметры, мм:	топлива	оболочки
	внутренний 7,65	7,61* 9,04
Объем газосборника твэла (выше уровня топлива), см ³	~15	
Уровень установки ТЭП относительно низа топливного сердечника, мм	260	
Выгорание топлива на уровне ТЭП, МВт-сут/кгU	51	
Давление гелия в твэле перед испытанием, МПа	0,6	
Давление теплоносителя, МПа	15	
Температура теплоносителя на входе в сборку, °C	250	

* Диаметр таблетки с выгоранием 51 МВт-сут/кгU.

Сравнение измеренной и рассчитанной температуры проведено на рис. 2.

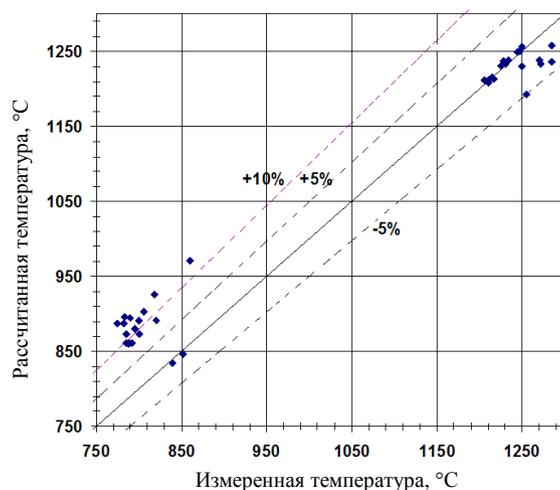


Рис. 2. Рассчитанные и измеренные значения температуры в центре РТ (■); — линия совпадения рассчитанных и измеренных значений температуры; - - - линии фиксированного отклонения (%) рассчитанных значений температуры от измеренных

Наблюдаемое отклонение расчета от эксперимента по всем точкам:

– среднее отклонение температуры

$$\varepsilon = \sum [(T_p - T_{и})/T_{и}] / n = 5,1 \% ;$$

– среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\sum ((T_p - T_{и})/T_{и})^2 / n} = 8,0 \% ;$$

где $T_{и}$, T_p – температуры измеренная и рассчитанная; n – число точек.

На максимальной ЛМ длительность выдержки составляла 6–7 ч (см. рис. 1) и температура ТЭП была выше 1200 °С (18 точек). Для этих точек погрешности существенно ниже средних: $\varepsilon = -0,8 \%$, $\sigma = 1,9 \%$. Исключая из этих точек полученные в течение часа после подъема ЛМ, получим $\varepsilon = -0,4 \%$, $\sigma = 1,2 \%$. Максимальные по модулю погрешности ε (выше 10 %) определены после циклических снижений ЛМ до ~180 Вт/см (рис. 2).

2.2. Испытание в реакторе МИР РТ из отработавшей ТВС ВВЭР-440 в режиме скачков мощности (FGR-2) [7]

Этот режим характеризуется увеличением температуры топлива после скачков мощности и ее постепенным снижением на постоянной ЛМ, а также повышенным выходом ГПД, в 3–5 раз выше, чем при режиме с постоянной мощностью. Исходные данные приведены в табл. 2, динамика температуры и ЛМ – на рис. 3. Зависимость выхода ГПД от максимальной ЛМ приведена на рис. 4 из работы [7], для исходных данных она линейно аппроксимирована на интервале 200–450 Вт/см между 5,5 и 43 %. Расчеты проводились для 20 моментов времени.

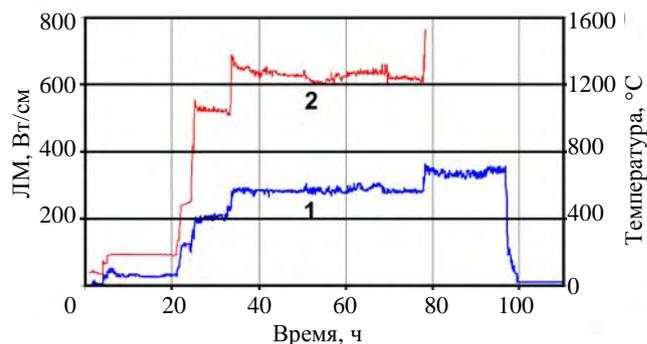


Рис. 3. Зависимость от времени максимальной ЛМ (1), температуры топливной ТЭП (2)

Исходные данные расчета в режиме скачков мощности

Параметр	Значение	
Время начала и конца расчетов (отсчитывается от момента выхода твэла на мощность), ч	25,3–77,75	
Длина топливного сердечника, м	0,4	
Диаметры, мм:	топлива	оболочки
внутренний	0,75	7,57
внешний	7,65	9,04
Объем газосборника твэла (выше уровня топлива), см ³	17	
Уровень установки ТЭП относительно низа топливного сердечника, мм	297	
Выгорание топлива на уровне ТЭП, МВт·сут/кгU	50	
Давление гелия в твэле перед испытанием, МПа	0,6	
Давление теплоносителя, МПа	12,3	
Температура теплоносителя на входе в сборку, °С	60–285	

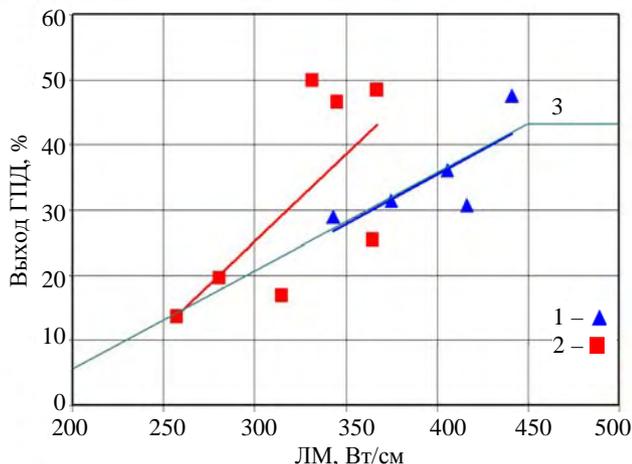


Рис. 4. Зависимость выхода ГПД из топлива от максимальной ЛМ (1 и 2 – эксперименты при выгорании (МВт·сут/кгU): 1 – 50, 2 – 60; 3 – исходные данные расчета)

Сравнение рассчитанной и измеренной температуры центра РТ приведено на рис. 5.

Наблюдаемое отклонение расчета от эксперимента по всем точкам:

– среднее отклонение температуры $\varepsilon = -0,2 \%$;

– среднеквадратичное отклонение $\sigma = 3,0 \%$.

За режимом скачка $\varepsilon = 0,5 \%$, $\sigma = 2,1 \%$.

Исходные данные расчета в режиме RIA

Параметр	Значение	
Длина топливного сердечника, м	0,2	
Диаметры, мм:	топлива	оболочки
	внутренний	7,65
	внешний	9,057
Объем газосборника твэла (выше уровня топлива), см ³	4	
Уровень установки ТЭП относительно низа топливного сердечника, мм	75	
Выгорание топлива на уровне ТЭП, МВт·сут/кгU	58,9	
Давление гелия в твэле перед испытанием, МПа	3,5	
Расход теплоносителя, кг/(с·твэл)	0,35	
Давление теплоносителя, МПа	15,5	
Температура теплоносителя на входе в сборку, °С	298	
Площадь сечения теплоносителя на твэл, см ²	1,83	
Гидравлический диаметр, см	0,94	

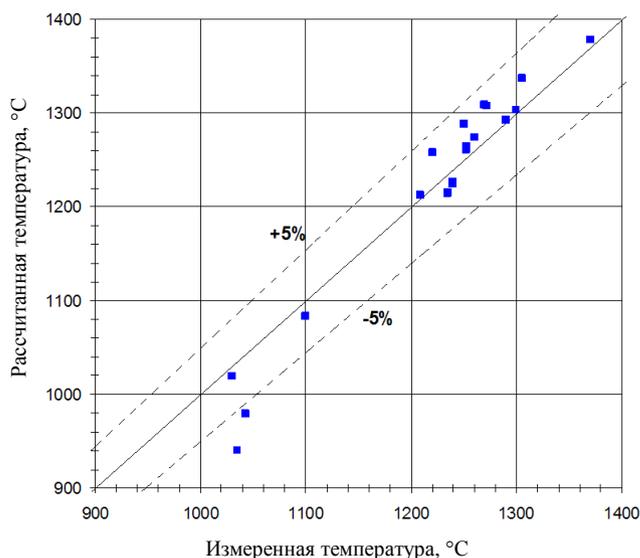


Рис. 5. Рассчитанные и измеренные значения температуры в центре РТ (■); — линия совпадения рассчитанных и измеренных значений температуры; - - - — линии фиксированного отклонения (%) рассчитанных значений температуры от измеренных

2.3. Испытание в реакторе МИР твэлов в режиме RIA ВВЭР-1000

Импульсное увеличение мощности реализовано с помощью движения экрана, поэтому энерговыделение изменяется неодинаково на разных высотных участках. Это смоделировано трехмерными функциями. Исходные данные приведены в табл. 3.

Сравнение измеренной и рассчитанной температуры топливной ТЭП в твэлах ВВЭР-1000 приведено на рис. 6. ЛМ перед импульсом определена по измеренной температуре ТЭП.

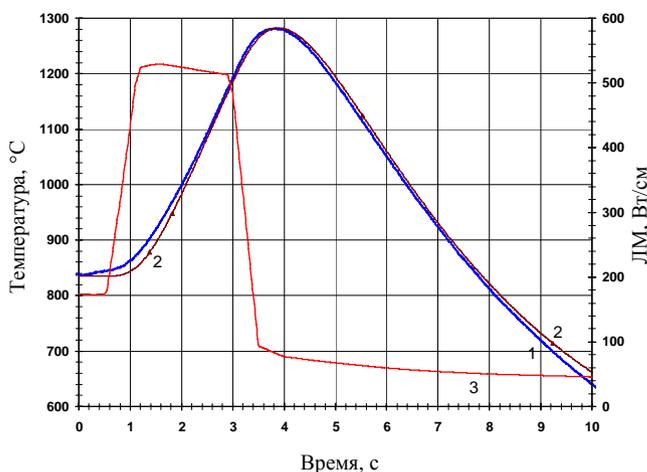


Рис. 6. Зависимость от времени измеренной температуры топливного ТЭП (1), рассчитанной температуры топливного ТЭП (2), ЛМ на уровне ТЭП (75 мм от низа топливного сердечника) (3)

3. Испытание в реакторе МИР твэлов ВВЭР-1000 в режиме RIA с кризисом теплообмена

В реакторе МИР планировался эксперимент со сборкой из трех укороченных твэлов ВВЭР-1000 в режиме RIA. Кризис достигается за счет длительности импульса и низкой массовой скорости. Выгорание топлива – 60 МВт·сут/кгU, твэл оснащен топливным ТЭП, рабочий спай которого находится на уровне 25 мм выше низа топливного сердечника. Расчет твэла выполнен по модели программы МУЗА с граничными параметрами, полученными по программе КОРСАР. Для определения влияния отдельных факторов на результаты расчета рассмотрены 3 варианта:

1) с учетом распределения Q_v по радиусу твэла ($k_r \neq 1$) и реальных материалов в разных сечениях (рабочий спай ТЭП на уровне 25 мм относительно низа топливного сердечника);

2) аналогично 1 варианту, но без учета распределения Q_v по радиусу твэла ($k_r = 1$);

3) аналогично 2 варианту, но материалы во всех сечениях как в сечении с ТЭП.

Зависимость температуры от времени приведена на рис. 7.

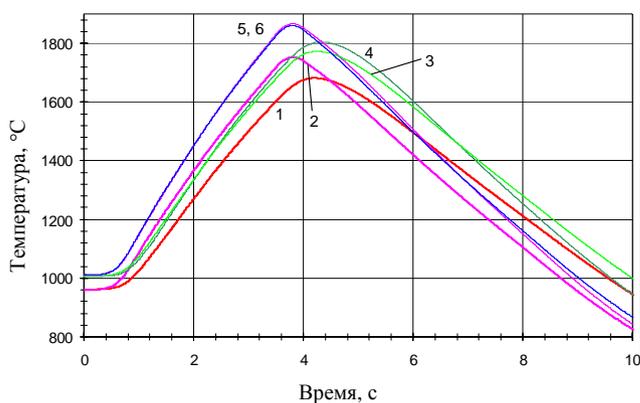


Рис. 7. Расчет эксперимента RIA с кризисом теплообмена. Зависимость температуры от времени: 1 и 2 – вариант 1; 3 и 5 – вариант 2; 4 и 6 – вариант 3 (1, 3, 4 относятся к ТЭП, 2, 5, 6 – к центру топливного сердечника)

Заключение

Программа МУЗА позволяет детально рассчитывать теплофизические параметры твэлов, испытываемых в исследовательских реакторах. Программа проверена путем сравнения с результатами экспериментов с твэлами ВВЭР, имевшими выгорание до 60 МВт·сут/кгU. Эксперименты выполнялись в режимах скачков и циклов мощности, а также RIA с импульсом мощности, и включали измерения температуры центра топливного сердечника и выхода ГПД. Программа МУЗА прошла апробацию и находится на стадии верификации.

Список литературы

1. Алексеев А. В. Разработка программы МУЗА для теплогидравлических расчетов экспериментальных устройств исследовательских ядерных реакторов // Сборник трудов ГНЦ НИИАР. – Димитровград, 2004, вып. 3, с. 78–85.
2. Алексеев А. В., Киселева И. В., Шулимов В. Н. Методика и результаты посттестовой обработки данных, полученных при испытании

в реакторе МИР топлива ВВЭР-1000 в условиях аварии с выбросом регулирующего органа // Сборник трудов ГНЦ РФ НИИАР. – Димитровград, 2008, г. вып. 4, с. 66–70.

3. Василенко В. А., Мигров Ю. А., Волкова С. Н. и др. Опыт создания и основные характеристики теплогидравлического расчетного кода нового поколения КОРСАР // Теплоэнергетика, 2002, № 11, с. 11–16.

4. Бобков В. П., Ефанов А. Д., Пометько Р. С., Смоголев А. П. Модифицированная таблица для расчета критических тепловых потоков в сборках тепловыделяющих стержней в треугольной упаковке // Теплоэнергетика, 2011, № 4, с. 43–51.

5. Безруков Ю. А., Астахов В. И., Трушин А. М., Богданов А. С., Логвинов С. А., Селезнев А. В. Исследование кризиса теплообмена применительно к реальным аксиальным профилям тепловыделения // III научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2003, т. 1, с. 67–71.

6. Ovchinnikov V. A. et al. Testing of WWER High Burnup Fuel under Power Cycling conditions. Enlarged Halden Programme Group Meeting. Storefjell Resort Hotel, Gol, Norway. 8–13 September, 2002. Session summary F6.0.

7. Smirnov A., Kanashov B., Kuzmin S., Kryukov F. Fission Gas Release from High Burn-Up VVER-440 Fuel under Steady State and Transient Operation Conditions. International Seminar «Fission Gas Behaviour in Water Reactor Fuels», CADARACHE, France, 26–29 September 2000. OECD, Nuclear Energy Agency, OECD Publishing, 14 Feb 2002. ISBN: 9789264197152, OECD Code: 662002021P1.

Контактная информация –

Алексеев Александр Вениаминович,
старший научный сотрудник ОАО «ГНЦ НИИАР»,
тел.: 8(905) 348 18 46, e-mail: radugka2@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.06.2013.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2013, вып. 3, с. 135–140.