

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ГАЗОВОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ ОБОЛОЧКОЙ И ТОПЛИВНОЙ ТАБЛЕТКОЙ ОТ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ И ВЛИЯНИЯ НА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

С.Б. Выговский, Ф.В. Груздов, Р.Т. Аль Малкави

НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31



Представлены результаты исследований зависимости нейтронно-физических характеристик активной зоны реакторов ВВЭР-1000 (1200) от поведения теплопроводности газового зазора между оболочкой и топливной таблеткой при выгорании топлива. Целью исследований было уточнение зависимости теплопроводности газового зазора между оболочкой и топливной таблеткой от выгорания топлива по данным итогового отчета по безопасности для Бушерской АЭС и определение масштаба влияния этой зависимости на пространственное распределение нейтронного поля, на темпы накопления ксенона и связанные с этим кинетические и динамические характеристики реакторной установки. Приведены результаты расчета параметров, контролирующих теплотехническую безопасность активной зоны, при выгорании топлива для обобщенной топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 при переходе на полугодовой топливный цикл. Приведены результаты численных исследований зависимости теплопроводности газового зазора между оболочкой и топливной таблеткой от выгорания. Показано, что влияние зависимости теплопроводности газового зазора от выгорания на стационарные характеристики невелико. Однако это влияние довольно существенно на темпы накопления ксенона, особенно для продленных топливных кампаний. В условиях реализации маневренных режимов, сопровождающихся ксеноновыми процессами в активной зоне, учет этой зависимости в инженерных кодах расчетной поддержки эксплуатации оборудования и ПМТ АЭС с ВВЭР-1000 (1200) становится важным и актуальным.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, теплопроводность газового зазора, глубина выгорания, ксеноновые колебания, реактивность, доплер-эффект.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье представлены результаты исследований зависимости теплопроводности газового зазора между оболочкой и топливной таблеткой (*газового зазора* – здесь и

© С.Б. Выговский, Ф.В. Груздов, Р.Т. Аль Малкави, 2018

далее для краткости) в топливе реакторов ВВЭР от глубины выгорания и ее влияния на нейтронно-физические характеристики активной зоны (АЗ). Актуальность данных исследований связана с необходимостью более точного учета параметров теплопроводности газового зазора в полномасштабных программных комплексах и их влияния на величину мощностного эффекта реактивности. Особенно это важно для более точного моделирования нестационарных ксеноновых процессов в АЗ в переходных режимах реакторной установки с одного значения мощности на другое. В таких режимах наблюдаются нестационарные ксеноновые процессы в АЗ, приводящие к возможному возникновению колебаний локальной мощности по объему АЗ.

Целью работы являлось исследование зависимости нейтронно-физических характеристик АЗ реакторов ВВЭР-1000 (1200) от поведения теплопроводности газового зазора в топливном элементе при выгорании топлива. Это исследование относится к задачам определения масштаба влияния так называемых «малых эффектов» в реакторной физике на нейтронно-физические характеристики ядерных реакторов на тепловых нейтронах. «Малый» эффект не связан с технологическими допусками или конструкционными просчетами. По мнению авторов, данный эффект является следствием неучета зависимости термического сопротивления зазора между оболочкой топлива и топливной матрицей (контактного термического сопротивления – КТС) в реакторе ВВЭР-1000 от выгорания топлива в штатных программах расчетной поддержки эксплуатации на АЭС и жизненно важным для некоторых эксплуатационных режимов. Данные явления особенно проявляются в маневренных режимах, связанных с переходом реакторной установки с одной мощности на другую и сопровождающихся ксеноновыми процессами в АЗ реактора, а также в режимах выгорания топлива в условиях продленных топливных циклов (до 1.5 лет). Если раньше маневренные режимы для реакторов ВВЭР-1000 носили разовый характер в случае первичного и вторичного регулирования частоты в энергосистеме, то сейчас на АЭС с ВВЭР-1200 планируется тестирование суточных режимов с маневрированием мощности в широком диапазоне их значений в произвольный момент кампании реактора [1]. В суточных режимах с изменением мощности доплер-эффект реактивности, составляющий основную часть мощностного эффекта, является основным стабилизирующим фактором для ксеноновых колебаний локальной мощности по объему АЗ. Поскольку теплопроводность газового зазора существенным образом влияет на температурное распределение в топливе и тем самым на величину мощностного эффекта реактивности, становится очень важной задача более точного расчета данного эффекта реактивности в комплексных моделях, входящих в состав программ инженерной поддержки эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Если опираться только на зависимость теплопроводности газового зазора для свежего топлива без учета влияния выгорания, можно существенным образом ошибиться в величине температурного эффекта реактивности по топливу в разные моменты кампании. Физическая картина явлений, происходящих в топливе при выгорании, заключается в следующем [2 – 5].

В начальный момент выгорания при образовании газообразных продуктов деления происходят распухание топливной матрицы и растрескивание топлива по радиусу. Это приводит к уменьшению зазора между топливом и оболочкой в топливном элементе и к повышению теплопроводности газового зазора.

Интенсивность указанных процессов зависит во многом от диаметра топливной таблетки, наличия центрального отверстия и удельной тепловой нагрузки. Чем больше диаметр таблетки и чем меньше центральное отверстие в ней, а также больше удельная тепловая нагрузка топлива, тем более ярко выражен описанный процесс.

Например, для топливной матрицы, используемой в топливных элементах в составе АЗ швейцарской АЭС «Гесген», выполненной по проекту KONVOI, по расчетным зависимостям контактного термического сопротивления, приведенным в проектной документации, наблюдается при больших значениях глубины выгорания топлива заметное увеличение КТС, которое носит устойчивый стационарный характер. Сведения о зависимостях КТС в топливных элементах реактора PWR от мощности и глубины выгорания топлива получены от специалистов АЭС «Гесген».

Основываясь на расчетных зависимостях контактного термического сопротивления, предоставленных специалистами АЭС «Гесген», авторы предполагают, что при больших глубинах выгорания и большой интенсивности накопления газообразных продуктов деления (при большой удельной мощности) происходят проводка газов через радиальные трещины на периферию таблетки и замедление процесса распухания. Данный процесс проиллюстрирован на рис. 1. В этом случае, как минимум, замедляется темп уменьшения величины газового зазора

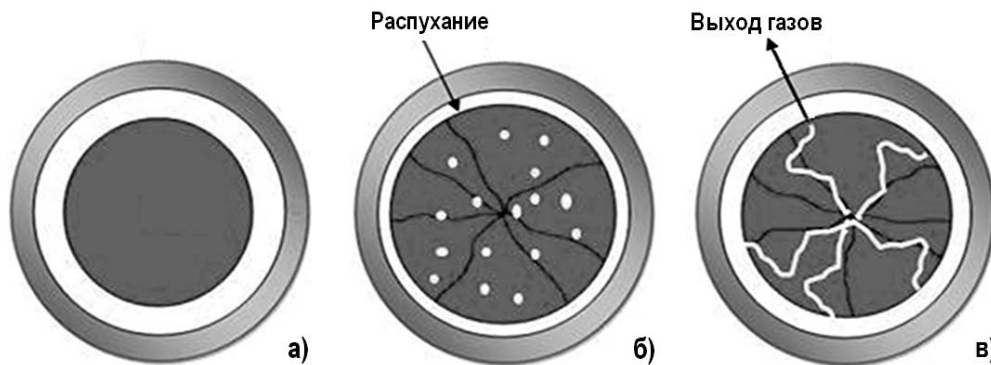


Рис. 1. Изменение величины газового зазора между оболочкой и топливной таблеткой с увеличением глубины выгорания для больших удельных нагрузок $Q_L > 400$ Вт/см для реактора PWR: а) – свежее топливо; б) – топливо с выгоранием; в) – топливо с большим выгоранием

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Были проанализированы данные по итоговому отчету по безопасности для Бушерской АЭС [6, 7]. На их основании была построена аппроксимация зависимости теплопроводности газового зазора от глубины выгорания на базе полиномиального подхода и уточнена зависимость теплопроводности зазора от линейной тепловой нагрузки для свежего топлива. Такой подход обеспечил полную адекватность результатов по построенной аппроксимации данным этого отчета, а также объяснил поведение теплопроводности зазора от глубины выгорания и удельной мощности за пределами границ области аппроксимации. Построенная аппроксимация зависимости теплопроводности газового зазора от глубины выгорания топлива была включена в состав программного обеспечения комплекса ПРОСТОР [8], являющегося программным ядром для моделей первого контура ПМТ 2, 3, 4 энергоблоков Калининской АЭС и ПМТ 3, 4 энергоблоков Ростовской АЭС. На рисунке 2 представлены зависимости величины КТС от удельной мощности для свежего топлива (по данным главного конструктора) и глубины выгорания при удельной мощности, равной 448 Вт/см, являющиеся результатами аппроксимации данных из итогового отчета для Бушерской АЭС.

Для моделирования процессов теплопроводности в топливном элементе была использована методика для расчета коэффициента теплопроводности уранового топлива UO_2 с учетом зависимости от глубины выгорания топлива и температуры, которая представлена на рис. 3 [9, 10]. Эта расчетная методика также была включена в модель АЗ в составе программного комплекса ПРОСТОР.

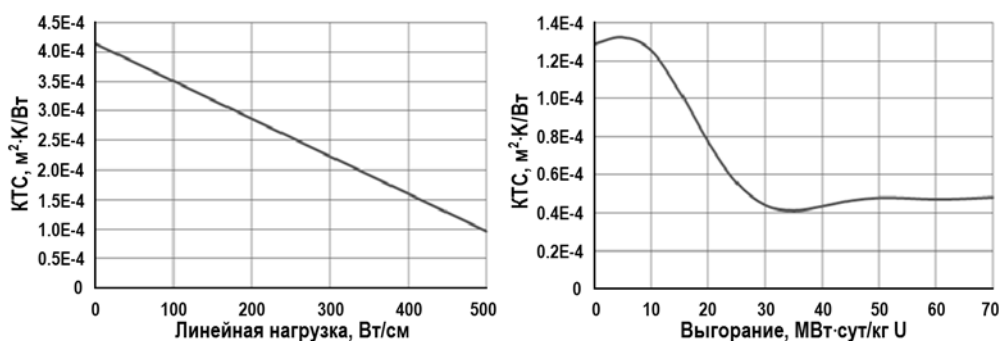


Рис. 2. Зависимости КТС газового зазора в топливе от линейной нагрузки на твэл для свежего топлива по данным главного конструктора и от глубины выгорания топлива при нагрузке на твэл 448 Вт/см по данным итогового отчета для Бушерской АЭС

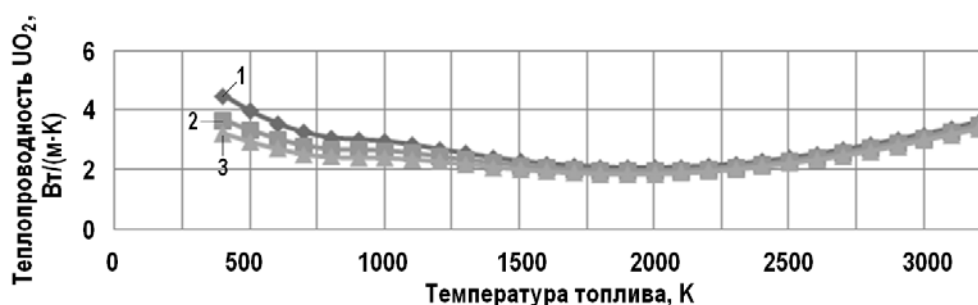


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности топлива UO_2 от температуры при различных глубинах выгорания: 1 – 20 Мвт-сут/кг U; 2 – 40 Мвт-сут/кг U; 3 – 60 Мвт-сут/кг U

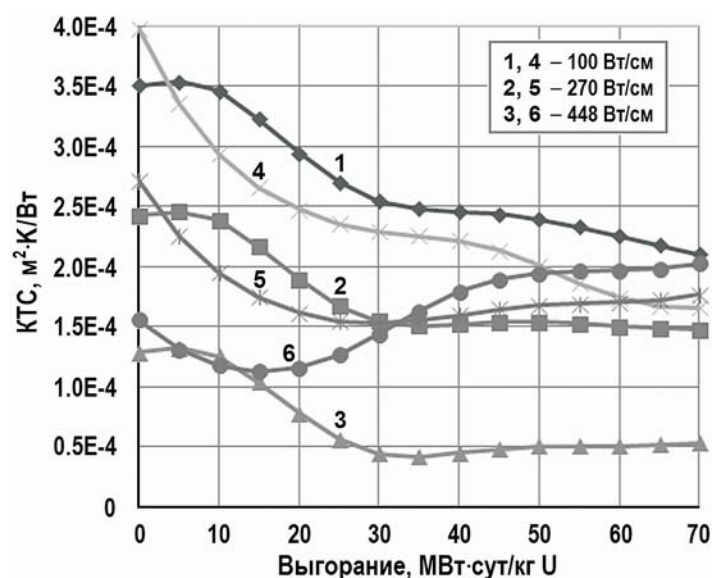


Рис. 4. Зависимости КТС газового зазора от глубины выгорания топлива при различных уровнях линейных тепловых нагрузок на твэлы в реакторах ВВЭР-1000 (полуэмпирические зависимости 1, 2, 3) и PWR-1000 (западные зависимости 4, 5, 6).

На базе разработанной аппроксимации были рассчитаны КТС газового зазора от глубины выгорания при различных значениях удельной мощности и проведено сравнение с КТС по зависимости для топлива PWR-1000 серии KONVOI (здесь и далее – *западная зависимость*) [11 – 15]. На рисунке 4 представлены рассчитанные зависимости величины термического сопротивления га-

зового зазора, полученные для топлив реакторов ВВЭР-1000 и PWR-1000.

РАСЧЕТЫ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

На основании зависимостей КТС и коэффициента теплопроводности топлива от температуры и глубины выгорания были проведены расчетные исследования с использованием программного комплекса ПРОСТОР по определению масштаба влияния этих зависимостей на нейтронно-физические характеристики АЗ. В первую очередь, было проведено исследование влияния зависимости теплопроводности газового зазора от выгорания топлива на стационарные характеристики АЗ реактора ВВЭР-1000 при выгорании, а именно, на длительность работы топливных загрузок и пространственное распределение нейтронного поля по объему АЗ. Расчеты выгорания топлива проводились для стационарной топливной загрузки одной из российских атомных станций. Эта загрузка является обобщенным примером топливных загрузок в реакторах ВВЭР-1000 при переходе топливного цикла на полугодовой топливный цикл. В расчетах использовались зависимости теплопроводности газового зазора от температуры топлива по данным главного конструктора без учета (первый вариант) и с учетом (второй вариант) этих зависимостей от выгорания топлива, взятых из итогового отчета по безопасности для Бушеровской АЭС. Расчеты проводились для базовой мощности 3120 МВт и продления топливной кампании за счет мощностного эффекта реактивности при снижении мощности до 75% от номинального значения.

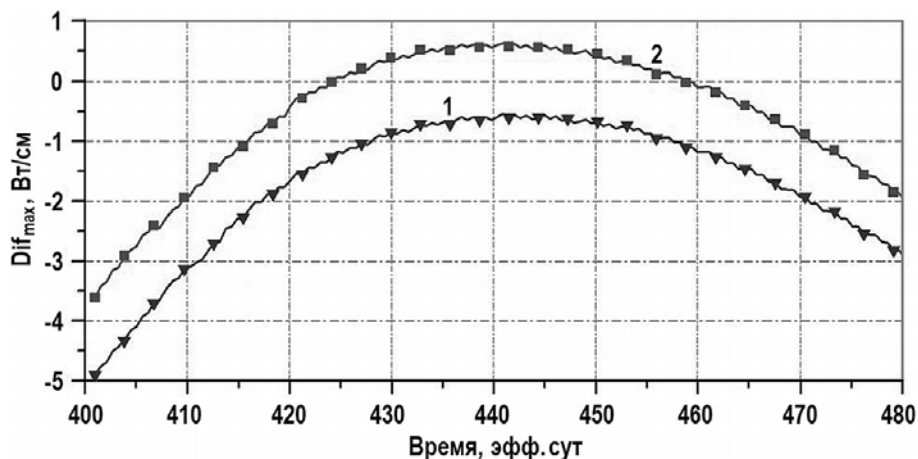


Рис. 5. Зависимость максимальной разницы между расчетной и разрешенной тепловой нагрузкой на твэлы от времени для стационарной топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 в самый критический момент кампании: 1 – вариант №1 (теплопроводность зазора без учета зависимости от выгорания); 2 – вариант №2 (теплопроводность зазора с учетом зависимости от выгорания)

На рисунке 5 приведены результаты расчета максимальной разницы между величиной расчетной тепловой нагрузки и предельно допустимой в конце кампании для стационарной загрузки: $Dif_{max} = \max(Q_L(x, y, z) - Q_{L\lim}(x, y, z))$. Приведенный интервал по времени выбран из условий достижения максимального значения разницы между расчетной и предельно допустимой нагрузкой на твэлы на всем интервале выгорания. Им оказывается интервал времени в конце кампании. Максимальная разность, величина которой не превышает 1 Вт/см, наблюдается в области седьмого датчика прямой зарядки в верхней части АЗ.

На рисунке 6 приведены результаты расчета критической концентрации борной кислоты при выгорании топлива в конце кампании. Различие в значениях концентрации между двумя вариантами составляет величину порядка 0.1 г/кг. Экстраполя-

ция к нулевой концентрации борной кислоты приводит к разнице в длительности кампании реактора порядка четырех – пяти эффективных суток.

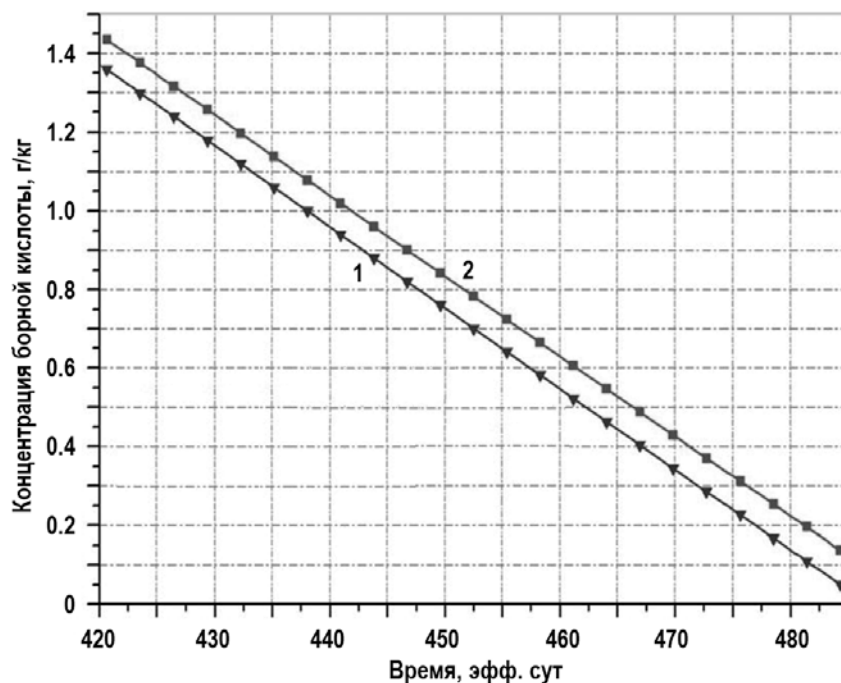


Рис. 6. Зависимость концентрации борной кислоты от времени работы стационарной топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 в самый критический момент кампании: 1 – вариант №1 (теплопроводность зазора без учета зависимости от выгорания); 2 – вариант №2 (теплопроводность зазора с учетом зависимости от выгорания)

Из результатов расчетов можно сделать вывод о небольшом увеличении длительности работы реактора на стационарной загрузке при учете зависимости теплопроводности от выгорания топлива, что обуславливается, с одной стороны, уменьшением величины эффективной температуры топлива, улучшающей размножающие свойства топливной решетки ВВЭР [16, 17]. Но, с другой стороны, при изменении изотопного состава при выгорании топлива с ростом глубины выгорания уменьшается теплопроводность самого топлива, вследствие чего увеличивается средняя температура топлива, а размножающие свойства топливной решетки ухудшаются. Оба явления обусловлены эффектом Доплера [18, 19], но имеют противоположное действие на размножающие свойства решетки. Таким образом, влияние снижения КТС в топливном элементе во многом компенсируется, что объясняет небольшое изменение в значениях линейных тепловых нагрузок на твэлы и критической концентрации борной кислоты.

Несмотря на незначительное уменьшение запаса по линейной тепловой нагрузке на твэлы необходимо отметить, что это приводит к некоторому ухудшению условий безопасной эксплуатации АЗ. Хотя полученные изменения являются небольшими по своей величине, влиянием зависимости теплопроводности газового зазора от выгорания топлива на высотное распределение локальной мощности по АЗ желательно не пренебрегать.

РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ КСЕНОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Проведены исследования влияния зависимости теплопроводности газового зазора от выгорания топлива как на характеристики, так и на динамику ксеноновых процессов в АЗ. Расчеты проводились для стационарной топливной загрузки при базовой мощно-

сти 3120 МВт для полугодового топливного цикла в разные моменты кампании. Погружением рабочей группы ОР СУЗ на 20% и в этом положении выдерживанием в течение трех часов изменялась конфигурация нейтронного поля по высоте реактора. Мощность реактора устанавливалась равной 75% номинальной мощности, которая удерживалась на этом уровне изменением критической концентрации борной кислоты. Расчеты были проведены для моментов кампании 150, 350 и 485 эфф. суток. Результаты зависимости аксиального офсета нейтронной мощности от времени для момента кампании 485 эфф. суток представлены на рис. 7.

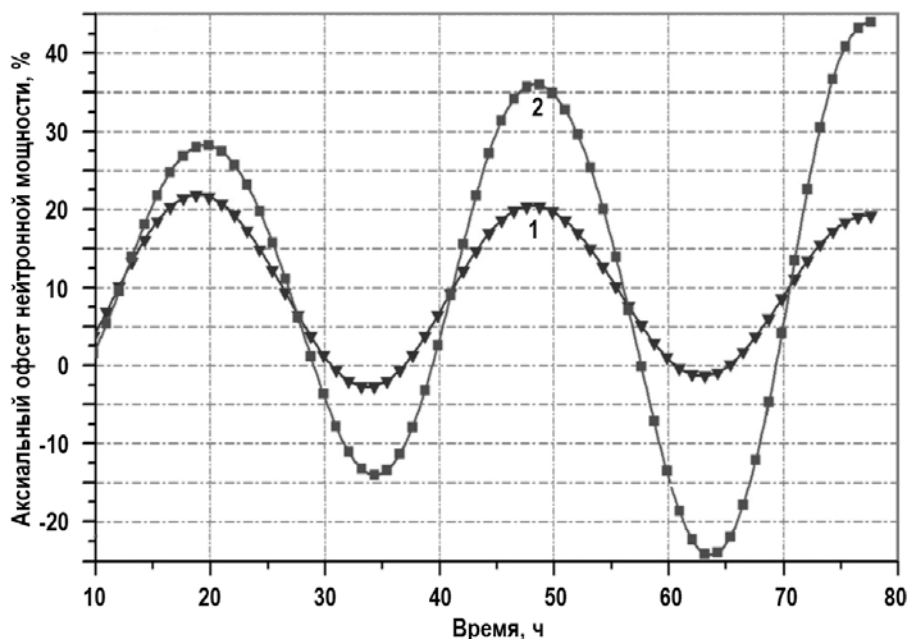


Рис. 7. Зависимость аксиального офсета мощности от времени для стационарной топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 на момент кампании 485 эфф. сут при 75% номинальной мощности: 1 – вариант №1 (теплопроводность зазора без учета зависимости от выгорания); 2 – вариант №2 (теплопроводность зазора с учетом зависимости от выгорания)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Актуальность учета зависимости теплопроводности газового зазора от выгорания топлива объясняется тем, что при большом выгорании наблюдается наибольшее изменение в значениях теплопроводности газового зазора и происходит соответственно максимальное влияние на радиальное распределение температуры в топливной таблетке. Эффект влияния снижения контактного термического сопротивления сопоставим с эффектом снижения теплопроводности топлива. Поэтому необходимо учитывать зависимость теплопроводности зазора от выгорания топлива, приводящей к изменению радиального распределения температур в топливе так, что средняя температура и соответственно эффективная температура топлива снижаются по сравнению с расчетом температурных полей в топливе без учета этого эффекта. Эффекта Доплера несколько улучшает размножающие свойства АЗ, приводит к небольшому увеличению длительности кампании и локальной мощности в верхней и нижней частях АЗ. Наличие данного эффекта снижает устойчивость реактора по отношению к ксеноновым колебаниям локальной мощности в зоне в конце кампании.

При проведении расчетов для обоснования безопасной эксплуатации оборудования АЭС применяется так называемый принцип «консервативности», который кратко можно охарактеризовать следующим образом. Любые приближения и упрощения в расчетных

методиках для обоснования безопасности ядерного объекта могут снижать уровень безопасности оборудования при их использовании. Надежные выводы о безопасности оборудования при расчетах того или иного явления можно получить, если расчеты реально показывают безопасный уровень эксплуатации. Если же приближения и упрощения дают результаты, косвенно приводящие к завышению уровня безопасности оборудования, то их лучше не использовать. Отсюда следует необходимость повышения точности расчета теплопроводности газового зазора при учете его зависимости от выгорания топлива как в проектных кодах, так и в кодах инженерной поддержки эксплуатации на АЭС с ВВЭР-1000 (1200).

Литература

1. Эволюционное и инновационное развитие реакторных установок водо-водяного типа. Доклад директора – генерального конструктора ОКБ «Гидропресс» С.Б. Рыжова. Международный форум «АТОМЭКСПО 2010». Электронный ресурс: http://2010.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present/7.5_ryzhov.pdf (дата доступа 04.04.2018).
2. Артемов В.Г., Артемова Л.М., Шемаев Ю.П. Исследование влияния выгорания топлива на теплофизические свойства твэла в совместных нейтронно-физических и теплогидравлических моделях. – г. Сосновый Бор: ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, 2007. – 10 с.
3. Ainscough J.B. Gap conduction in Zircaloy-Clad LWR fuel rods. – Paris (France): Committee of the Safety of Nuclear Installations OECD Nuclear Energy Agency, 1982. – 52 p.
4. Dean R.A. Thermal contact conductance between UO and zircaloy-2. – Westinghouse Electric Corporation, 1962. – 127 p.
5. Ainscough J.B., Hobbs W.R. The effects of gas composition and pressure on the thermal conductance of UO-Zircaloy interfaces under irradiation. – IAEA, Vienna, 1979. – PP. 23-36.
6. Rahgoshay M., Rahmani Y. Study of the Effects of Changing Burn-up and Gap Gaseous Compound on the Gap Convection Coefficient (in a Hot Fuel Pin) in WWER-1000 Reactor. – Tehran (Iran): Islamic Azad University, 2007. – PP. 93-95.
7. Rahgoshay M., Rahmani Y. Study of the Role of Gap Conductance Coefficient of Fuel on Increasing Safety in WWER-1000 Reactors. – Tehran (Iran): Islamic Azad University, 2011. – 12 p.
8. Выговский С.Б., Зимин В.Г., Чернов Е.В. Приложение к аттестационному паспорту № 182 от 28.10.2004. Программный комплекс ПРОСТОП (версия 1). – М.: НИЯУ «МИФИ», 2004. – 8 с.
9. Lucuta P.G., Matzke HJ, Hastings I.J. A pragmatic approach to modeling thermal conductivity of irradiated UO₂ fuel: Review and recommendations // J. Nucl. Mater. – 1996. – Vol. 232. – PP. 166-180.
10. Wiesenack W. Separate Effect Studies at the Halden Reactor Project to Fuel Thermal Performance Modeling. Proc. of the Seminar on Thermal Performance of High Burn-up LWR Fuel, 3 – 6 March 1998. – Cadarache, France, NEA, 1998. – PP. 197-208. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/science/pubs/1998/1247-thermal-cadarache-1998.pdf> (дата доступа 04.04.2018).
11. Tong L.S., Weisman J. Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors. – Illinois (USA): American Nuclear Society, 1996. – 748 p.
12. Mesquita Amir Z., Rezende Hugo C., Costa Antonio Carlos L. da. Experimental determination of heat transfer coefficients in uranium zirconium hydride fuel rod. – Reactor and Irradiation Service, Centre of Nuclear Technology Development, Brazil, 2007. – 9 p.
13. Medvedev A., Bogatyr S., Kouznetsov V., Khvostov G., Lagovsky V., Korystin L., Poudov V. Fuel Rod Behaviour at High Burnup WWER Fuel Cycles. – М.: FSUE VNIINM, 2003. – 11 p.
14. Yousef I., Al Zabena A., Villarino E. Development of fuel rod thermal-hydraulic model for the thermal-hydraulic feedback in condor code. // Mecanica Computacional. – 2014. – Vol. XXXIII. – PP. 2969-2982.
15. Geelhood K.J., Luscher W.G. FRAPCON-3,5: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup. – Richland (USA):

Pacific Northwest National Laboratory, 2014. – 152 p.

16. *Kudrov A., Kuz'min A., Rakov Y.* Effective Fuel Temperature of WWER-1000. – Tomsk (Russia): National Research Tomsk Polytechnic University, 2017. – 4 p. Электронный ресурс:

<http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46017/1/doi.org-10.1051-mateconf-201714101030.pdf> (дата доступа 04.04.2018).

17. *Выговский С.Б., Груздов Ф.В., Аль Малкави Р.Т.* Расчетное исследование зависимости нейтронно-физических характеристик активной зоны реакторов ВВЭР от температурного распределения в топливе и его влияния на параметры ксеноновых процессов в зоне. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2016. – № 1. – С. 225-235.

18. *Вейнберг А.М., Вигнер Е.П.* Физическая теория ядерных реакторов. / Пер. с английского. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1961. – 733 с.

19. *Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С.* Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. Учеб. пособие для вузов / Под ред. Г.А. Батя. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.

Поступила в редакцию 10.04.2017 г.

Авторы

Выговский Сергей Борисович, доцент, к.т.н.,

E-mail: vigovskii@mail.ru

Груздов Фёдор Владимирович, инженер

E-mail: f_gruzdov@mail.ru

Аль Малкави Рашдан Талал, аспирант

E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com

UDC 621.039.50

STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE CLADDING – FUEL PELLET GAP CONDUCTANCE COEFFICIENT ON THE FUEL BURN-UP AND THE EFFECTS ON THE NEUTRONIC CHARACTERISTICS OF THE REACTOR CORE

Vygovskiy S.B., Gruzдов F.V., Al Malkawi R.T.

NRNU MEPHI

31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, Russia

ABSTRACT

This paper presents the results of the research to study the dependence of the VVER-1000 (1200) reactor core neutronic characteristics on the cladding – fuel pellet gap conductance coefficient in the process of the fuel burn-up. The purpose of the study was to determine more accurately the dependence of the cladding – fuel pellet gap conductance coefficient on the fuel burn-up as shown in the Final Safety Report for the Bushehr NPP and to determine the extent of the effects this dependence had on the spatial distribution of the neutron field, on the xenon accumulation rate, and on the kinetic and dynamic behavior of the reactor facility. The paper presents the results of calculating the parameters using which the heat engineering safety of the reactor core is monitored in the process of the fuel burn-up (for a generalized fuel load of a VVER-1000 reactor) during the transition to an

18-month nuclear fuel cycle. This paper also includes the results of a numerical research to determine the cladding – fuel gap conductance coefficient depending on the fuel burn-up. These results have shown that, in reality, the gap conductance coefficient dependence on the burn-up does not affect greatly the steady-state characteristics. At the same time, it affects to rather a great extent the xenon accumulation rate, specifically in the event of an extended fuel life. In conditions of maneuvering (load following) modes accompanied by the xenon processes in the reactor core, it proves to be very important and timely to take into account this dependence in the engineering codes used to support the operation of the VVER-1000 (1200) NPP equipment and full-scale simulator.

Key words: VVER-1000, gap conductance coefficient, burn-up, xenon oscillations, reactivity, Doppler effect.

REFERENCES

1. Evolutionary and innovative development of WWER facilities. Report of Director – General Designer of OKB «Gidropress» S.B. Ryzhov. International forum «ATOMEXPO 2010». Available at: http://2010.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/Present/7.5_ryzhov.pdf (accessed Apr 04, 2018) (in Russian).
2. Artemov V.G., Artemova L.M., Shemaev Yu.P. The influence of the dependence of burn-up for thermophysical properties of a fuel element in thermal-hydraulic and neutron-physical models. *Sosnovy Bor. FGUP NITI n.a. A.P. Alexandrov Publ.*, 2007, 10 p. (in Russian).
3. Ainscough J.B. *Gap conduction in Zircaloy-Clad LWR fuel rods*. Paris. Committee of the Safety of Nuclear Installations OECD Nuclear Energy Agency, 1982, 52 p.
4. Dean R.A. *Thermal contact conductance between UO and zircaloy-2*. Westinghouse Electric Corporation, 1962, 127 p.
5. Ainscough J.B., Hobbs W.R. *The effects of gas composition and pressure on the thermal conductance of UO-Zircaloy interfaces under irradiation*. IAEA, Vienna, 1979, pp. 23-36.
6. Rahgoshay M., Rahmani Y. *Study of the Effects of Changing Burn-up and Gap Gaseous Compound on the Gap Convection Coefficient (in a Hot Fuel Pin) in WWER-1000 reactor*. Tehran. Islamic Azad University, 2007, pp. 93-95.
7. Rahgoshay M., Rahmani Y. *Study of the Role of Gap Conductance Coefficient of Fuel on Increasing Safety in WWER-1000 Reactors*. Tehran. Islamic Azad University, 2011, 12 p.
8. Vygovskiy S.B., Zimin V.G., Chernov E.V. *Program Complex PROSTOR (ver. 1). Application to the Attestation Manual No 182 (Oct 28, 2004)*. Moscow. National Research Nuclear University «MEPhI», 2004, 8 p. (in Russian).
9. Lucuta P.G., Matzke H.J., Hastings I.J. A pragmatic approach to modelling thermal conductivity of irradiated UO₂ fuel: Review and recommendations. *J. Nucl. Mater.* 1996, v. 232, pp. 166-180.
10. Wiesenack W. *Separate Effect Studies at the Halden Reactor Project to Fuel Thermal Performance Modeling*. Proc. of the Seminar on Thermal Performance of High Burn-up LWR Fuel, 3 – 6 March 1998. Cadarache, France, NEA, 1998, pp. 197-208. Available at: <https://www.oecd-nea.org/science/pubs/1998/1247-thermal-cadarache-1998.pdf> (accessed Apr 04, 2018).
11. Tong L.S., Weisman J. *Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors*. Illinois, USA, American Nuclear Society, 1996, 748 p.
12. Mesquita Amir Z., Rezende Hugo C., Costa Antonio Carlos L. da. *Experimental determination of heat transfer coefficients in uranium zirconium hydride fuel rod*. Reactor and Irradiation Service, Centre of Nuclear Technology Development, Brazil, 2007, 9 p.
13. Medvedev A., Bogatyr S., Kouznetsov V., Khvostov G., Lagovsky V., Korystin L., Poudov V. *Fuel Rod Behaviour at High Burnup WWER Fuel Cycles*. Moscow. FSUE VNIINM

Publ., 2003, 11 p.

14. Yousef I., Al Zabena A., Villarino E. Development of fuel rod thermal-hydraulic model for the thermal-hydraulic feedback in condor code. *Mecanica Computacional*. 2014, v. XXXIII, pp. 2969-2982.

15. Geelhood K.J., Luscher W.G. *FRAPCON-3,5: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup*. Richland, USA, Pacific Northwest National Laboratory, 2014, 152 p.

16. Kudrov A., Kuz'min A., Rakov Y. *Effective Fuel Temperature of WWER-1000*. Tomsk, Russia. National Research Tomsk Polytechnic University Publ., 2017, 4 p. Available at: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/46017/1/doi.org-10.1051-mateconf-201714101030.pdf> (accessed Apr 04, 2018).

17. Vygovskiy S.B, Gruzlov F.V., Al Malkawi R.T. Computational study of the dependence on the neutron-physical characteristics of the WWER core on the temperature distribution in the fuel and its influence on the parameters of the xenon processes in the core. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*. 2016, no. 1, pp. 225-235 (in Russian).

18. Weinberg A.M., Wigner E.P. *Physical theory of nuclear reactors*. Moscow. Izdatel'stvo Inostrannoj Literatury Publ., 1961, 733 p. (in Russian).

19. Bartolomey G.G., Bat' F.A., Bajbakov V.D., Alkhutov M.S. *Fundamentals of the Theory and Calculation Methods in Nuclear Power Reactors*. Moscow. Energoizdat Publ., 1982, 510 p. (in Russian).

Authors

Vygovskiy Sergey Borisovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: vigovskii@mail.ru

Gruzlov Fyodor Vladimirovich, Engineer

E-mail: f_gruzlov@mail.ru

Al Malkawi Rashdan Talal, Ph.D. Student

E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com