

ЕНЕРГЕТИКА
ТЕПЛОТЕХНІКА
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ENERGETICS
HEAT ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621. 039.542

С.Е. Щеклеин, д-р. техн. наук, проф.,
Г.П. Титов, канд. физ-мат. наук, доц.,
Е.В. Борисова, специалист,
Урал. федерал. ун-т им. первого Президента
России Б.Н. Ельцина (г. Челябинск, Россия)

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НА ГЛУБИНУ ВЫГОРАНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

С.Е. Щеклеин, Г.П. Титов, Е.В. Борисова. **Вплив температурних характеристик на глибину вигорання ядерного палива.** Наведені результати розрахункового дослідження впливу температурних теплоносіїв та палива на ефективність використання ядерного палива. Отримано апроксимуючі результати чисельних розрахунків аналітичного рівняння, що дозволяє виконати попередню оцінку для реакторів водо-водяного типу.

Ключові слова: ядерне паливо, ефективність використання, ядерний реактор, ВВЕР.

С.Е. Щеклеин, Г.П. Титов, Е.В. Борисова. **Влияние температурных характеристик на глубину выгорания ядерного топлива.** Представлены результаты расчетного исследования влияния температурных характеристик теплоносителя и топлива на эффективность использования ядерного топлива. Получены аппроксимирующие результаты численных расчетов аналитического уравнения, позволяющие выполнить предварительную оценку для реакторов водо-водяного типа.

Ключевые слова: ядерное топливо, эффективность использования, ядерный реактор, ВВЭР.

S.E. Shcheklein, G.P. Titov, E.V. Borisova. **The influence of temperature features on the fuel burn-up fraction.** The results of numerical study of the influence of the coolant and fuel temperature features of on the efficiency of the nuclear fuel use are presented. An equation which describes the results of numerical calculation and allows to perform a preliminary estimation for the water-cooled and water-moderated reactors is obtained. It is shown that the reduction of temperature of coolant and nuclear fuel leads to the increase of the reactor lifetime and fuel burn-up fraction.

Keywords: nuclear fuel, efficiency, nuclear reactor, WWER.

В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2020 г. прогнозируется рост производства тепловой энергии в 2010 г. на 9...13 и в 2020 г. на 22...34 % больше, чем в 2000 г.; предусматривается к 2020 г. довести выработку тепла атомными энергоисточниками до

30 млн Гкал/год с годовым замещением потребления до 24 млрд м³ газа. К 2030 г. замещение газа должно составить до 65 млрд м³/год.

Соответствующий раздел “Технико-экономические исследования и обоснование использования атомных энергоисточников для теплофикации” содержится в Федеральной целевой программе “Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007...2009 гг. и на перспективу до 2015 года” в рамках Перехода к инновационным технологиям развития атомной энергетики.

Разработка концепции атомного теплоснабжения России [1] требует поиска оптимальных типов ядерных энергетических установок, конструкций реакторов, параметров активной зоны и топливных композиций, физических и теплофизических характеристик источника тепла и ядерных топливных композиций. Реакторные установки для теплофикации характеризуются более низкой температурой отпускаемой тепловой энергии, чем для целей электроэнергетического производства; более низкой энергонапряженностью активной зоны [2].

Целью данной работы являлось исследование влияния температур теплоносителя и ядерного топлива на изменение реактивности, глубины выгорания и продолжительности кампании ЯЭУ. Диапазоны исследуемых параметров, как по температуре теплоносителя, так и по температуре топлива, определялись требуемыми параметрами теплоснабжения и свойствами, в первую очередь, теплопроводностью материалов ТВЭЛ.

Исследования проводились с помощью программы WIMS-D4, позволяющей рассчитывать при заданном начальном составе ядерного топлива изотопный состав и коэффициенты размножения в любой произвольный момент времени [3]. Программа WIMS-D4 использует 69-групповую библиотеку ядерных констант в области замедления и термализации нейтронов. В расчетной модели использовались геометрические характеристики активной зоны реакторной установки, аналогичной ВВЭР-1000. Для всех исследуемых температур тепловая мощность установки принималась постоянной. Расчет проводился в 26 энергетических группах. Для изучения влияния температуры теплоносителя (замедлителя) и топлива на нейтронно-физические характеристики активной зоны варьировалась средняя температура теплоносителя в диапазоне 30...350 °С и температура топлива в диапазоне 100...2000 °С. Для упрощения расчетов при моделировании не учитывалось термическое сопротивление оболочки ТВЭЛ. Обогащение топлива принималось равным 2; 4 и 6 %.

В результате проведенных расчетов получены эффективные коэффициенты размножения в зависимости от средних температур теплоносителя (замедлителя) и топлива для различных обогащений топливной композиции.

Приведены результаты расчетов реактивности ρ для начала кампании в зависимости от температур ядерного топлива T_T и теплоносителя $T_{т/н}$, обогащение — 4 %, топливная композиция — UO₂.

Для постоянных средних температур теплоносителя получена графическая зависимость (рис. 1). С уменьшением температуры топлива освобождается дополнительная реактивность вследствие эффекта Доплера [4, 5]. Приведены результаты расчетов реактивности при постоянной температуре топлива в зависимости от температуры теплоносителя (рис. 2). Следует отметить, что снижение температуры теплоносителя обеспечивает более высокий уровень реактивности во всем диапазоне изменения температур ядерного топлива.

Изменение реактивности в зависимости от температуры теплоносителя обусловлено изменением ядерных свойств и концентрации ядер теплоносителя (замедлителя) от температуры. Основное влияние на изменение реактивности в данном случае оказывает изменение плотности теплоносителя.

Начальный запас реактивности определяет продолжительность кампании реактора. Чем выше реактивность в начальный момент времени, тем больше количество эффективных суток работы реактора. При заданной величине топливной загрузки реактор сможет работать до тех пор, пока $K_{эф}$ не станет равным единице, и это условие принималось за основу определения количества эффективных суток. Расчетные данные по изменению продолжительности кампании приведены на рис. 3.

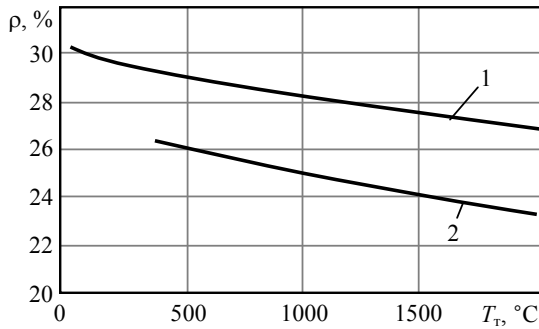


Рис. 1. Зависимость реактивности от температуры ядерного топлива при температуре теплоносителя, 50 (1) и 300 °C (2)

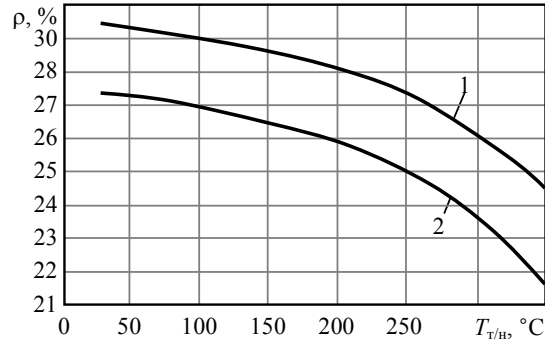


Рис. 2. Зависимость реактивности от температуры теплоносителя при температуре ядерного топлива 400 (1) и 1600 °C (2)

В расчетах значение температуры топлива задавалось постоянным (400 и 1600 °C), а температура теплоносителя варьировалась в исследуемом диапазоне температур 50...350 °C.

Результаты показывают значительное увеличение продолжительности кампании с понижением температуры теплоносителя (замедлителя).

Повышение продолжительности кампании (времени использования топлива) приводит к увеличению доли разделившихся изотопов и, как следствие, к росту глубины выгорания.

Достижимая глубина выгорания определялась как

$$B = \frac{Q_T T_{эф}}{G_U}, \quad \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут.}}{\text{кг}}, \quad (1)$$

где Q_T — тепловая мощность реакторной установки, МВт;

$T_{эф}$ — число эффективных суток, сут.;

G_U — загрузка урана, кг.

Расчет по выражению (1) позволил получить численные значения для построения номограммы трех взаимозависимых величин: глубины выгорания, температуры теплоносителя и температуры топлива. Зависимость выгорания от 23 до 40 (МВт·сут/кгU) для топлива UO₂ обогащением 4 % от температур топлива и теплоносителя приведены на рис. 4.

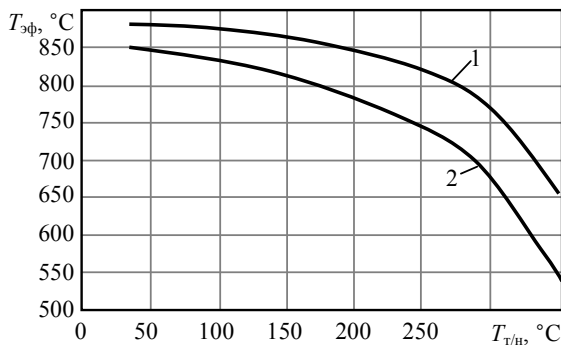


Рис. 3. Зависимость продолжительности топливной кампании от температуры теплоносителя для температуры топлива, 400 (1) и 1600 °C (2)

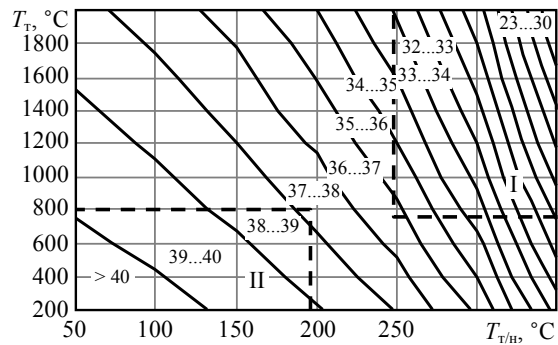


Рис. 4. Номограмма изменения глубины выгорания в зависимости от температур топлива и теплоносителя

Наибольшая глубина выгорания топлива достигается в области низких температур как теплоносителя, так и топлива. В рассматриваемом диапазоне были выделены две зоны: первая зона (I) соответствует температурным характеристикам современных АЭС, вторая (II) соответствует температурным характеристикам ЯЭУ, предназначенных для теплофикационного использования.

Результаты расчетов глубины выгорания в зависимости от температуры компонентов среды (теплоносителя, топлива) и уровня обогащения топлива представлены в таблице.

С повышением обогащения эффект влияния температуры на выгорание увеличивается, что объясняется усилением эффекта Доплера.

*Выгорание топлива разного обогащения в зависимости от температур топлива и теплоносителя, МВт/сут*т*

Обогащение, %	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
$T_{т/н}, ^\circ\text{C}$	30			100			200			300			350		
$T_{т}, ^\circ\text{C}$	30			100			200			300			350		
200	18	58	99	17	56	96	17	53	91	15	47	80	13	40	70
600	17	56	97	16,5	54	94	16	51	88	14	45	77	12	38	66
1000	16	55	95	16	53	92	15	49	85	13	43	73	11	36	62
1400	15,5	53	93	15	51	90	14	48	83	12	41	71	10	34	59
1800	15	52	91	14	50	88	13,5	46	80	11	39	68	9	32	57

Так как программа WIMS-D4 является сложным и многопараметрическим расчетным кодом, использование которого требует значительных временных и вычислительных ресурсов, для расчетов влияния температурных характеристик и уровня обогащения в целях предварительного анализа предлагается следующая аппроксимирующая зависимость:

$$B = \left(\alpha - \beta \frac{1800 + T_{т}}{420 - T_{т/н}} \right) (c + 2) - \gamma \quad (2)$$

где B — глубина выгорания топлива, МВт·сут/кгU;

$T_{т}$ — температура топлива, $^\circ\text{C}$;

$T_{т/н}$ — средняя температура теплоносителя, $^\circ\text{C}$;

c — обогащение топлива, %;

$\alpha=11,32$, $\beta=0,0728$, $\gamma=26$ — постоянные.

Данная зависимость, полученная методом обработки значений глубин выгораний рассчитанных при помощи WIMS-D4 в исследованном диапазоне изменения температуры, обеспечивает точность аппроксимации $\pm 5\%$.

В результате выполненных расчетов определены величины дополнительной реактивности, глубины выгорания и продолжительности кампании при снижении температурного режима активной зоны, что показывает эффективность использования ядерных энергетических установок для целей отопительного и промышленного теплоснабжения.

Литература

1. Федеральная целевая программа “Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007 – 2009 годы и на перспективу до 2015 года” / Утв. постановлением Пр-ва РФ от 6 окт. 2006 г. № 605. — М.: Энергия, 2006. — 72 с.
2. Самойлов, О.Б. Что такое атомная станция теплоснабжения / О.Б. Самойлов, В.С. Куль, Б.А. Авербах. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 96 с.
3. Байбаков, В.Д. Коды для расчета ядерных реакторов: учеб. пособие / В.Д. Байбаков, Ю.Б. Воробьев, В.Д. Кузнецов. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. — 163 с.
4. Красин, А.К. Влияние температуры нейтронного газа на продолжительность кампании и воспроизводство горючего в энергетическом реакторе / А.К. Красин, М.Е. Минашин, В.Я. Свириденко // Атом. энергия. — 1958. — Т. 5, вып. 2. — С. 111—118.
5. Украинцев, В.Ф. Эффекты реактивности в энергетических реакторах: учеб. пособие / В.Ф. Украинцев. — Обнинск, ИАТЭ, 2000 — 60 с.

References

1. Federal'naya tselevaya programma "Razvitie atomnogo energopromyshlennogo kompleksa Rossii na 2007-2009 gody i na perspektivu do 2015 goda" [The Federal Target Program "Development of Atomic Power Industry of Russia for 2007-2009 and up to 2015"] / Utv. postanovleniem Pr-va RF ot 6 okt. 2006 g. № 605. — Moscow, 2006. — 72 p.
2. Samoylov, O.B., Chto takoe atomnaya stantsiya teplosnabzheniya [What is an atomic heat supply station] / O.B. Samoylov, V.S. Kul', B.A. Averbakh. — Moscow, 1989. — 96 p.
3. Baybakov, V.D., Kody dlya rascheta yadernykh reaktorov: ucheb. posobie [Codes for nuclear reactor calculation: tutorial] / V.D. Baybakov, Yu.B. Vo-rob'ev, V.D. Kuznetsov. — Moscow, 2003. — 163 p.
4. Krasin, A.K. Vliyanie temperatury neytronnogo gaza na prodolzhitel'nost' kampanii i vosproizvodstvo goryuchego v energeticheskom reaktore [Neutron gas temperature impact on fuel lifetime and conversion in a power reactor] / A.K. Krasin, M.E. Minashin, V.Ya. Sviridenko // Atom. energiya [Atomic energy]. — 1958. — Vol. 5, issue 2. — PP. 111—118.
5. Ukraintsev, V.F. Effekty reaktivnosti v energeticheskikh reaktorakh: ucheb. posobie [Reactivity effects in power reactors: tutorial]. — Obninsk, 2000. — 60 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Маслов О.В.

Поступила в редакцию 19 сентября 2011 г.