

<https://altenergiya.ru/gidro/prilivnye-elektrostantsij.html> (дата обращения: 11.11.2021).

4. Асарин А.Е. Развитие гидроэнергетики России // Гидротехническое строительство. 2003. №6. С. 60-66.
5. Уникальная ГЭС с дамбой в Охотском море сделает Россию водородной сверхдержавой // Федеральное агентство новостей. [Электронный ресурс].-Режим доступа: <https://social.riafan.ru/1441488-unikalnaya-ges-s-damboi-v-ohotskom-more-sdelat-rossiyu-vodorodnoi-sverhderzhavoi> (дата обращения: 06.11.2021).
6. На Камчатке реанимируют советский проект по водороду на \$200 млрд // rbc.ru. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.rbc.ru/business/12/07/2021/60ec4ab99a7947fca921f1eb> (дата обращения: 06.11.2021).

Научный руководитель: А.Ю. Долгих, ст. преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА ВВЭР ЗА СЧЕТ ПЕРЕХОДА НА АВАРИЙНО- СТОЙКОЕ ТОПЛИВО

В.В. Гусаров
Томский политехнический университет
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5061

Термин устойчивое к авариям толерантное топливо - Accident Tolerant Fuel – (ATF) в формулировке МАГАТЭ должно быть работоспособно как в нормальных условиях работы, так, и это главное – в условиях потери теплоносителя. Основной разрушающий твэлы фактор связан с паро-циркониевой реакцией, происходящей при температуре свыше 1200 °С. Пути решения этой проблемы лежат как в модификации или замены циркониевых оболочек, так и в модификации или применении нового ураноемкого холодного топлива. В результате увеличивается время нагрева до критической температуры.

Объектом исследования эффективности замены ядерного топлива является 4 энергоблок Калининской АЭС с реакторной установкой В-320, в настоящее время работающий на мощности 104 % от номинальной.

Таблица 1. Исходные данные

Наименование, единицы измерения		Значение
Тип ТВС		ТВС-PLUS
Среднее по а.з. обогащение, %		4,7
Рабочее давление, МПа		16
Температура тн, °С	На входе в реактор	291
	На выходе из реактора	321
Тепловая мощность реактора, МВт		3120

Удельное энерговыделение в а.з. реактора МВт/м ³	110
Исследуемые концепции, топливо/материал оболочки ТВЭЛ	UO ₂ /Zr
	U ₃ Si ₂ /SiC

В процессе исследования были выполнены расчеты: теплогидравлический, нейтронно-физический и расчёт тепловой схемы на конденсационный режим.

Теплогидравлический расчет

Проведён теплогидравлический расчёт реактора со стандартными UO₂/Zr и U₃Si₂/SiC твэлами по методике [3].

Температура наружной поверхности оболочки:

$$t_{об}^{нар} = t(z) + \frac{0,94 \cdot q_{l0}}{\pi \cdot d_{ТВЭЛ} \cdot \alpha} \quad (1)$$

Температура внутренней поверхности оболочки твэла:

$$t_{об}^{вн} = t_{об}^{нар} + \frac{0,94 \cdot q_l}{\pi \cdot d_{об.ср}} \cdot \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об}} \quad (2)$$

Температура наружной поверхности топливного сердечника:

$$t_c = t_{об}^{вн} + \frac{0,94 \cdot q_l}{\pi \cdot d_{ГЗ.ср} \cdot \alpha_{ГЗ}} \quad (3)$$

Температура на поверхности отверстия топливного сердечника:

$$t_0 = t_c + \frac{0,94 \cdot q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot d_0^2}{d_c^2 - d_0^2} \cdot \ln \frac{d_c}{d_0} \right) \quad (4)$$

Результаты расчётов максимально напряженного твэла в центральной плоскости а.з. приведены на рисунке 1.

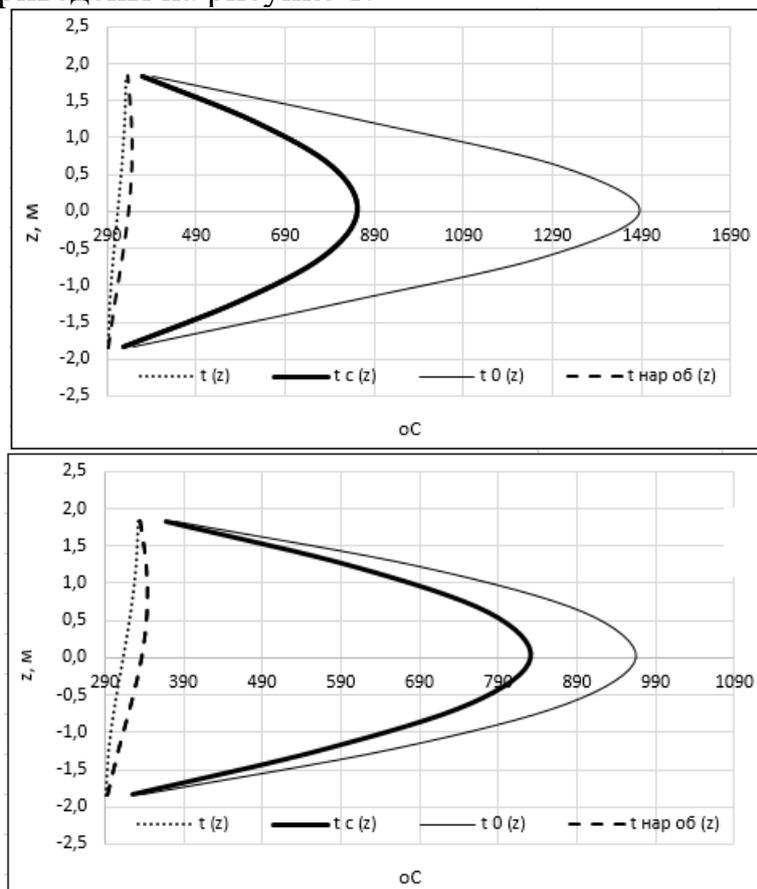


Рис. 1 (а). Распределение температур по высоте для максимально напряженного твэла концепции UO₂/Zr; (б) - Распределение температур по высоте для максимально напряженного твэла концепции U₃Si₂/SiC

Запас до кризиса теплообмена (5) для реакторов с водяным теплоносителем является основным ограничением с точки зрения безопасной работы.

$$k_{\text{зап}}(z) = \frac{q_{\text{кр}}(z)}{q_s(z)} \quad (5)$$

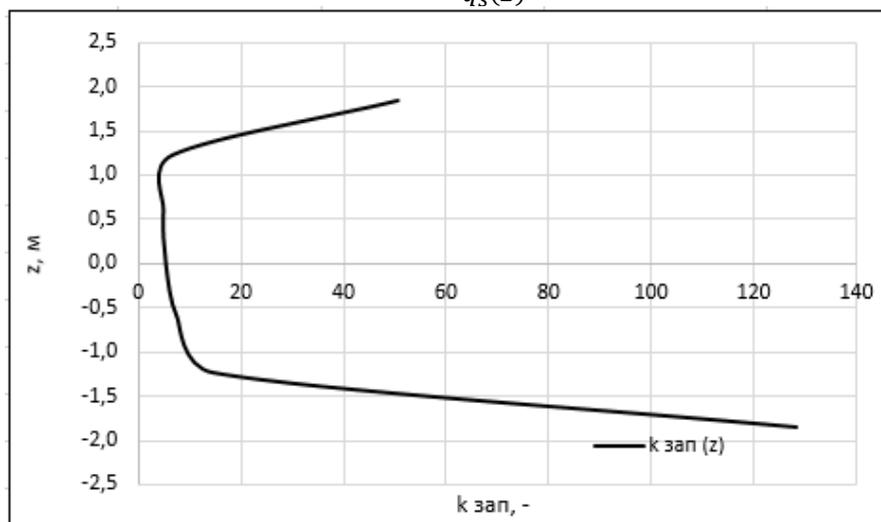


Рис. 2. Распределение запаса до кризиса по высоте для максимально напряженного ТВЭЛ

По итогам теплогидравлического расчёта получено, что максимальные температуры оболочки и топливных стержней не достигают предельно допустимых, а коэффициент запаса находится в диапазоне допустимых значений.

Нейтронно-физический расчёт

В ходе нейтронно-физического расчёта были определены значения реактивности для состояний реактора: «холодного», «горячего» и «на мощности», найдена длина компании в эфф. сутках по методике [2].

Эффективный коэффициент размножения:

$$k_{\text{эф}} = \nu \mu \phi \theta P_L P_T \quad (6)$$

Реактивность реактора:

$$\rho = \frac{k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}} \quad (7)$$

По итогам нейтронно-физического расчёта компания составила 968 эфф. суток, что можно объяснить повышенной ураноемкостью силицидного топлива.

Расчёт тепловой схемы

В ходе расчёта тепловой схемы были определены параметры регенеративной системы и в узловых точках турбоустановки, для работы на номинальных параметрах и на повышенной мощности по методике [1].

КПД блока по отпуску электроэнергии (нетто):

$$\eta_c^{\text{н}} = \eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{ПГУ}} \cdot (1 - k_{\text{с.н.}}), \quad (8)$$

где $k_{\text{с.н.}}$ – удельный расход электроэнергии на собственные нужды станции.

Удельный расход выгоревшего ядерного горючего на отпуск электроэнергии АЭС:

$$b_{\text{я.г.}}^* = \frac{0,0537}{\eta_c^{\text{н}}}. \quad (9)$$

Удельный расход природного урана на АЭС:

$$b_{\text{я.г.}} = \frac{1000}{24 \cdot \bar{B} \cdot \eta_c^2} \cdot \frac{x_n - x_0}{x_e - x_0}, \quad (10)$$

где \bar{B} – глубина выгорания топлива; x_n, x_e, x_0 – содержание урана-235 в свежем, природном уране и в отвале обогатительного производства.

По итогам расчёта тепловой схемы базового объекта КПД блока по отпуску электроэнергии составил 0,331.

Заключение

Итогом проведённых расчётов и сравнения полученных результатов стала принципиальная возможность замены в уже существующем энергоблоке топливной составляющей концепции UO_2 / Zr на $\text{U}_3\text{Si}_2 / \text{SiC}$. Что приведёт к улучшению нейтронно-физических характеристик, повышению аварийной безопасности за счёт лучших теплофизических свойств топлива и отсутствию пароциркониевой реакции.

Результатом такого перехода также станет рост издержек на внедрение и производство нового топлива и оболочек ТВЭЛов, что будет нивелировано учитывая повышенную компанию и возможность снизить обогащение топлива за счёт ураноёмкости U_3Si_2 . Не менее важным остаётся и тот факт, что разработка предлагаемой концепции $\text{U}_3\text{Si}_2 / \text{SiC}$ ведётся давно и в настоящее время существует множественные результаты расчётов, моделирования и экспериментов как в Российской Федерации, так и за рубежом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Антонова А.М., Воробьев А.В. Атомные электростанции: учебное пособие / А.М. Антонова, А.В. Воробьев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 230 с;
2. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учеб. пособие для вузов/ Г. Г. Бартоломей, Г. А. Бать, В. Д. Байбаков, М. С. Алхутов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989, - 512 с.: ил;
3. РБ-040-09 – Расчетные соотношения и методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования водоохлаждаемых ядерных энергетических установок;

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, к.п.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.