

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЁРДОГО ДИОКСИДА УРАНА В РАБОЧЕМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР СОВРЕМЕННЫХ ВВЭР

Е.Ю. Синяткин, А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: kuzminav@tpu.ru

Керамическое тугоплавкое топливо UO_2 в виде таблеток, помещенных в циркониевую оболочку, нашло широкое применение в современных ВВЭР. В конце прошлого столетия в результате проведения масштабных исследований были получены новые результаты теплофизических свойств, во многом отличающиеся от данных, представленных в работах [1,2]. Обобщение современных данных представлено в пособии [3]. Целью работы является проведение сравнительного анализа справочных данных, апробация и выбор формул для расчётов номинальных режимов ВВЭР.

Некоторые из основных свойств UO_2 при 0,1 МПа и 298 К приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные свойства UO_2 [3]

Теоретическая плотность, $кг/м^3$	10960
Температура плавления, К	3120 ± 30
Температура кипения, К	3815
Теплоёмкость, $кДж/кг$	0,235
Теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$	8,68
Коэффициент линейного расширения, $1/К$	$9,75 \cdot 10^{-6}$

Применение циркониевой оболочки в современных реакторах типа ВВЭР ограничивает тепловыделение в топливных таблетках и тем самым определяет термодинамические параметры цикла, которые существенно ниже, чем в обычной теплоэнергетике. Отметим некоторые предельные тепловые характеристики тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) при работе реактора ВВЭР-1000 на номинальной мощности [4]. Внутренний объём ТВЭЛ в холодном состоянии при внутреннем диаметре циркониевой оболочки $7,72 \pm 0,08$ мм равен 181 см^3 , в котором таблетки топлива занимают 70%, а оставшийся объём заполнен гелием. При работе на мощности по объёму таблетки равномерно выделяется тепловая энергия до 450 кВт/л и устанавливаются средние температуры в центре таблетки примерно $1500 \dots 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ и на поверхности – около $470 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальные температуры в центре таблетки и на её поверхности равны соответственно 1940 и $900 \text{ }^\circ\text{C}$. Перепад температуры на газовом зазоре между таблетками и оболочкой в среднем равен $100 \text{ }^\circ\text{C}$, а по толщине оболочки $\sim 23 \text{ }^\circ\text{C}$. В этих условиях температура наружной поверхности трубки ТВЭЛ равна $\cong 350 \text{ }^\circ\text{C}$, а удельные поверхностный и линейный тепловые потоки равны примерно $600 \text{ кВт}/м^2$ и $17 \text{ кВт}/м$. Приведенные данные примерно определяют температурную область на номинальном режиме ВВЭР.

Из теплофизических характеристик в новом справочном издании [3] несколько изменилась теоретическая плотность твердого диоксида урана: вместо 11000 (см. табл. 1). Впервые появилась зависимость плотности UO_2 от температуры T :

$$\rho = \rho_0 \cdot K^{-3},$$

где ρ_0 – теоретическая плотность UO_2 , K – относительный коэффициент линейного теплового расширения, который с удовлетворительной точностью определяемый одним из соотношений Мартина [3]:

$$K = \frac{L(T)}{L(273)} =$$

$$0,99672 + 1,179 \cdot 10^{-5} T - 2,429 \cdot 10^{-9} T^2 + 1,219 \cdot 10^{-12} T^3.$$

Существенные изменения произошли в описании теплоёмкости (рис.1). Прежде всего, диапазон экспериментальных данных расширился вплоть до температуры плавления.

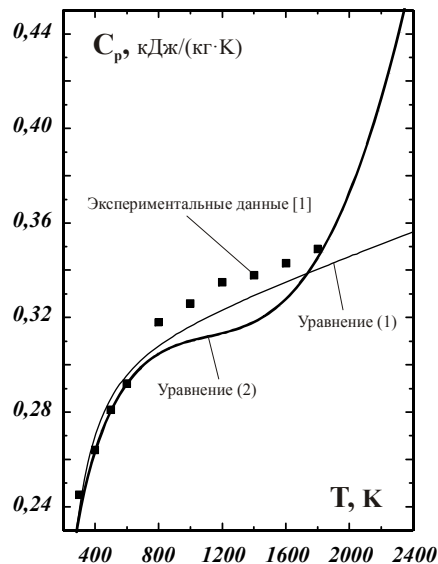


Рис. 1. Сравнение справочных данных по теплоемкости UO_2

Заметно изменился характер поведения старых [1]

$$C_p = 0,2973 + 25 \cdot 10^{-6} T - 6000 T^{-2} \quad (1)$$

и новых аппроксимаций экспериментальных данных [3]

$$C_p = 0,1925 + 0,3245 \cdot \tau - 0,3108 \cdot \tau^2 + 0,1163 \cdot \tau^3 - 0,0097 \cdot \tau^4 - 0,00263 \cdot \tau^{-2},$$

(2)
где $\tau = (T/1000)K$.

Пористость топлива p , определяемая далее в объемных долях, может изменить значения коэффициента теплопроводности λ . Пористость топлива зависит от технологии изготовления топливных таблеток и меняется заметно в процессе работы реактора из-за растрескивания горючего.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные [1] зависимости коэффициента теплопроводности UO_2 для разных значений пористости. Одни из первых расчетных аппроксимаций, представленных в [2]:

$$\lambda = \frac{5500}{560 + T} + 0,942 \cdot 10^{-10} T^3, \quad (3)$$

а также в справочнике [5]

$$\lambda = 11,5 - 1,14 \cdot 10^{-2} T + 4,4 \cdot 10^{-6} T^2 - 5 \cdot 10^{-10} T^3 \quad (4)$$

скорее всего ориентированы на наиболее вероятное значение пористости, определяемое технологией изготовления топлива – $p=0,05$. Погрешность последней аппроксимации составляет $\pm 20\%$.

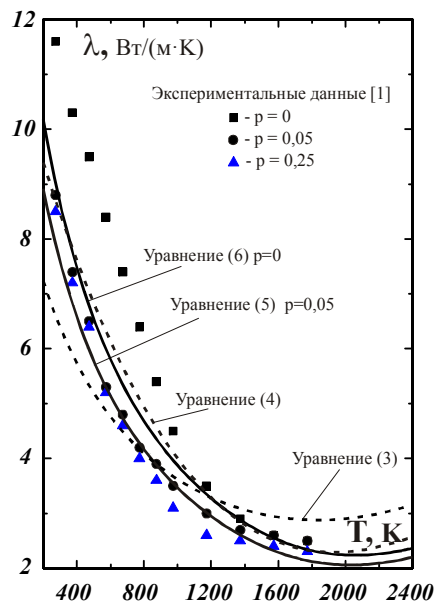


Рис. 2. Зависимость теплопроводности от пористости UO_2

В результате обобщения более обширных экспериментальных данных [6] было получено следующее рекомендуемое уравнение для коэффициента теплопроводности UO_2 с пористостью $p=0,05$ (рис. 2):

$$\lambda_{0,05} = \frac{100}{7,5408 + 17,692 \cdot \tau + 3,6142 \cdot \tau^2} + \frac{6400}{\tau^{5/2}} \exp\left(\frac{-16,35}{\tau}\right). \quad (5)$$

Погрешность этого соотношения до границы в 2000 К составляет +10 %, а свыше равна +20 %.

Значения коэффициента теплопроводности для UO_2 теоретической плотности λ_0 и для любых других значений пористости определяется соотношением Брандта и Нойера

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot (1 - \alpha p), \quad (6)$$

где $\alpha = 2,6 - 0,5\tau$.

Результаты сопоставления данных по теплофизическим свойствам UO_2 , представленных в справочниках [1] и [3], показывают:

- в [3] впервые приведены обобщающие соотношения по λ , C_p и ρ вплоть до температуры плавления;
- выявлен принципиально иной характер поведения зависимости теплоёмкости при температурах свыше 800 К (рис. 1);
- зависимости λ от температуры [3] показали заметно меньший эффект влияния пористости и наименьшие значения в области наиболее вероятных температур UO_2 при использовании циркониевой оболочки твэл (рис. 2).

Все это говорит о необходимости применения аппроксимаций теплофизических свойств UO_2 только по справочнику [3].

Список литературы

1. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
 2. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.: ил.
 3. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов специальностей: 14.03.05 – Ядерные реакторы и энергетические установки, 14.04.04. – Атомные электрические станции и установки / Под общ. ред. проф. П.Л.Кириллова; 2-е изд. перераб. и доп. – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.
 4. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность / А.М. Афров, С.А. Андрущечко, В.Ф.Украинцев и др. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с.
 5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общ. ред. П.Л.Кириллова.– 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.: ил.
- Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solid UO_2 : На сайте «Интернет» [http:// www.insc.anl.gov/matprop/uo2/thcsuo2.pdf](http://www.insc.anl.gov/matprop/uo2/thcsuo2.pdf) [30 P.].