

ПОДХОДЫ К ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ ПРИМЕНИМОСТИ ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АЭС

Молотова И.А., Молотов И.М. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия;
ФБУ «НТЦ ЯРБ», Москва, Россия), Ягов В.В. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия)

Введение

В большинстве АЭС с легководными реакторами эксплуатируются топливные элементы (ТВЭЛы), оболочка которых выполнена из сплавов циркония (сплавы Zircaloy-2, Zircaloy-4, Zirlo, M5, Э110 в России), а ядерное топливо представляет собой диоксида урана. В режимах нормальной эксплуатации АЭС на поверхности циркониевой оболочки ТВЭЛА образуется защитный слой оксида циркония, препятствующий дальнейшей коррозии оболочек ТВЭЛОВ. Свойства циркониевых сплавов достаточно хорошо изучены, однако в случае запроектных аварий при взаимодействии паров воды с циркониевыми сплавами возникает пароциркониевая реакция, в результате которой образуется водород и происходит значительное выделение тепла, достаточное для расплавления оболочки ТВЭЛА:



Так, после аварии на японской АЭС «Фукусима-Дайичи» (2011 г.) по всему миру были начаты научные исследования, направленные на исключение возможности или смягчения пароциркониевой реакции. Одно из направлений таких исследований связано с созданием новых материалов, использующихся для изготовления топливной матрицы и оболочек ТВЭЛОВ. Такое устойчивое к авариям топливо получило название «толерантное топливо» (в зарубежной литературе – Accident Tolerant Fuel) [1].

1. Концепции толерантного топлива

Разработки в рамках концепции толерантного топлива ведутся как по замене самого топлива, так и по отношению к материалам оболочек ТВЭЛОВ. На сегодняшний день рассматриваются несколько основных проектов толерантного топлива применительно к оболочкам ТВЭЛОВ для легководных реакторов, предполагающие нанесение тонких защитных покрытий на циркониевые сплавы либо полную замену циркония новыми материалами (сплавы FeCrAl, молибден, 42ХНМ российского производства, керамические композиты в долгосрочной перспективе).

Исследования свойств новых материалов толерантного топлива должны включать изучение его термомеханических, нейтронно-физических и теплогидравлических свойств. К материалам толерантного топлива по сравнению с существующей топливной системой Zr/UO₂ предъявляются следующие требования:

- высокая температура плавления оболочки ТВЭЛА;
- замедленное взаимодействие оболочки ТВЭЛА с горячим паром с уменьшением выделения тепла и водорода;
- улучшенные термомеханические свойства ТВЭЛОВ для сохранения геометрии и целостности тепловыделяющих сборок, в том числе после аварийного охлаждения;
- увеличенная теплопроводность топлива.

Помимо прочего, применительно к материалам оболочек ТВЭЛОВ актуальным направлением является изучение его характеристик при заливе активной зоны реактора водой в случае возникновения аварии с потерей теплоносителя. Как свидетельствуют различные исследования, изменение свойств материала поверхности либо нанесение на него защитных покрытий может существенно повысить температуру перехода от пленочного кипения к более интенсивному режиму охлаждения (например, [2], [3]). Анализ научных работ показывает, что на сегодняшний день не существует универсальных моделей для расчета температуры перехода к интенсивному режиму охлаждения.

2. Теплофизические исследования применительно к материалам толерантного топлива

2.1. Методика эксперимента

На кафедре Инженерной теплофизики НИУ «МЭИ» проводятся экспериментальные исследования по изучению нестационарных процессов охлаждения высокотемпературных цилиндрических тел. Рабочими образцами являются металлические цилиндры длиной 40–50 мм и диаметром 10 мм, внутри которых крепятся термопары (рис. 1). Образцы выполнены из различных металлов, в том числе из материалов толерантного типа. Экспериментальные исследования проводятся в жидкостях с различными теплофизическими свойствами (вода, этанол, бинарные смеси этанол-вода различных концентраций, FC-72) при различных недогревах до температуры насыщения жидкости и давлении от 0,1 до 0,5 МПа [4].

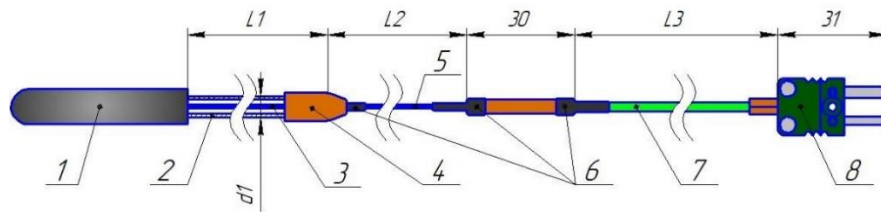


Рис. 1. Схема крепления термопар:

- 1 – цилиндрический образец; 2 – трубка-державка ($d1=3$ мм);
3 – термокабель, проходящий внутри трубки-державки (тип К – хромель-алюмель) $d=1$ мм;
4 – зажимная цанга для фиксации термокабеля; 5 – выпуск термокабеля из трубки-державки;
6 – термоусадка; 7 – удлиняющий (компенсационный) провод тип К; 8 – штекер стандарт тип К

2.2. Сравнение экспериментальных данных с расчетами по модели возникновения высокоинтенсивного режима охлаждения

Полученный массив экспериментальных данных используется для проверки физической модели возникновения высокоинтенсивного режима охлаждения, разработанной в 2018 году профессором В.В. Яговым. Данная модель учитывает влияние теплофизических свойств охлаждающей жидкости, а также свойств охлаждаемой поверхности:

$$T_w - T_{lim} = C_4 \sqrt{\frac{\rho_{liq} \lambda_{liq} (T_{lim} - T_s) h_{LG}}{(\rho c \lambda)_w}} \left(R_z \left(\left(\frac{g \Delta \rho h_{LG}}{\lambda_v \nu \Delta T_z} \right)^{\frac{1}{4}} + \frac{h_{LG}}{\lambda_v \Delta T} \sqrt{\frac{\rho_{liq} \rho_v g \beta \Delta T_{sub} z}{Pr_{liq}}} \right) \right)^{n_1} \quad (1)$$

где T_{lim} – температура предельного перегрева жидкости; C_4 – численная константа; ρ , c , λ – плотность, теплоемкость, теплопроводность; T_s – температура насыщения жидкости; h_{LG} – теплота парообразования; R_z – шероховатость по максимальной высоте выступа; g – ускорение свободного падения; z – линейный масштаб; ν – вязкость; $\Delta T = T_{tr} - T_{lim}$, T_{tr} – температура поверхности, при которой начинается интенсивное охлаждение; β – коэффициент термического расширения жидкости; ΔT_{sub} – недогрев жидкости до температуры насыщения; Pr – число Прандтля. Индексы w , v , liq относятся к поверхности, пару и жидкости.

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по указанной модели значений перегрева стенки представлено на рис. 2 для различных материалов без и с нанесением различных покрытий, в том числе для материалов толерантного топлива (Zr+Cr, FeCrAl, FeCrAl+Cr). Как видно из рисунка, большинство экспериментальных значений находится в интервале ± 30 % от значений, предсказанных моделью (формула 1).

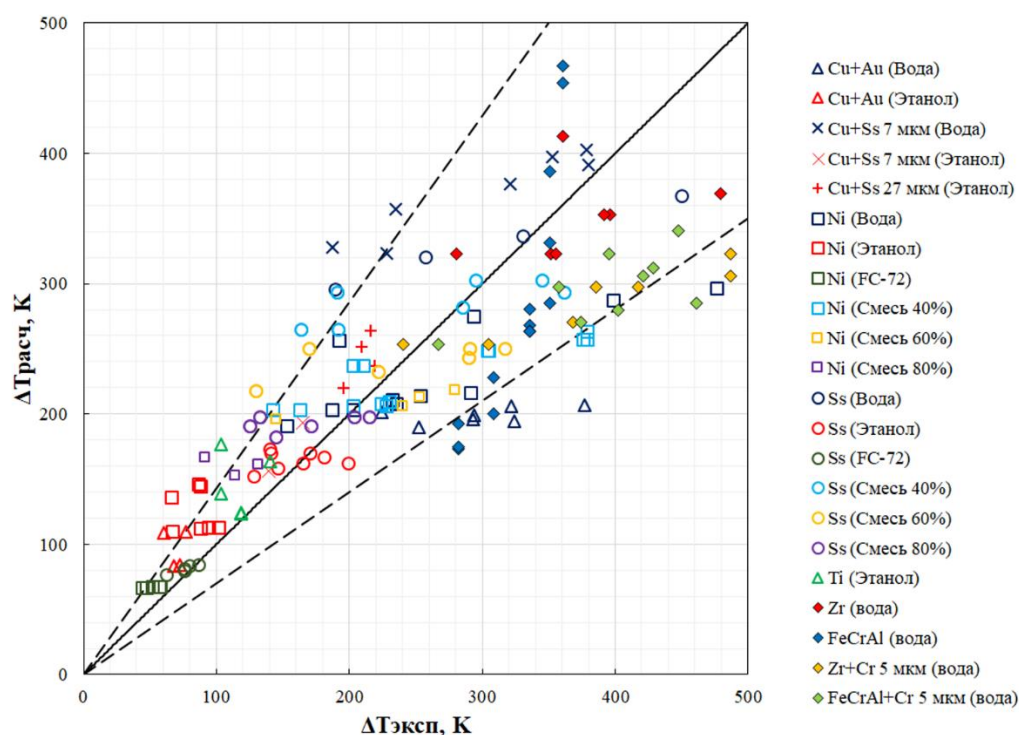


Рис. 2. Сравнение экспериментальных ($\Delta T_{\text{эксп}}$) и расчетных ($\Delta T_{\text{расч}}$) значений перегрева стенки, при которых наступает режим интенсивного охлаждения. Пунктирные линии соответствуют интервалу $\pm 30\%$ от вычисленных значений

Заключение

Таким образом, наиболее изученными проектами толерантного топлива на сегодняшний день являются нанесение защитных покрытий на циркониевые сплавы (в основном, хромсодержащих) либо замена циркония сталями и сплавами или керамическими композитами. Однако еще остаются нерешенные вопросы, требующие дополнительных исследований в части термомеханических, теплофизических и нейтронно-физических свойств толерантного топлива. Полученные экспериментальные результаты по охлаждению высокотемпературных цилиндрических тел свидетельствуют о том, что разработанная физическая модель высокоинтенсивного режима охлаждения может найти применение в программах для ЭВМ, предназначенных для моделирования теплогидравлических процессов в легководных реакторах.

Работа была поддержана РНФ, проект № 20-79-10363.

Список литературы

1. Rebak R. B., ed. Accident-Tolerant Materials for Light Water Reactor Fuels / Elsevier. 2020. 221 с.
2. Yeom H., Jo H., Johnson G., Sridharan K., Corradini M. Transient Pool Boiling Heat Transfer of Oxidized and Roughened Zircaloy-4 Surfaces during Water Quenching // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Т. 120. С. 435–446.
3. Kang J. et al. Quenching of candidate materials for accident tolerant fuel-cladding in LWRs // Annals of Nuclear Energy. 2018. Т. 112. С. 794–807.
4. Zabiroy A. R., Yagov V. V., Kalita V. I., Radyuk A. A., Molotova I. A., Belyaev I. A. Heat transfer under quenching of cylindrical bodies in subcooled liquids // Nuclear Engineering and Design. 2021. Т. 383. С. 111380.
5. Yagov V. V., Zabiroy A. R., Kanin P. K. Heat transfer at cooling high-temperature bodies in subcooled liquids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. Т. 126. С. 823–830.