

**Исследование инерционности термопарных измерений в экспериментах с твэлами**Д.К. Валетов<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)<sup>2</sup>Институт безопасного развития атомной энергетики РАН

Испытания тепловыделяющих элементов (твэлов) ядерных реакторов на разрушение в условиях, близких к условиям тяжёлой аварии, проводятся уже несколько десятилетий. Одна из основных целей экспериментов – получение данных для верификации расчётных кодов для моделирования тяжёлых аварий. Верификация состоит в моделировании эксперимента, т.е. расчёте температуры и времени разрушения твэла, определяемого по температурному и механическим критериям. Часто расчётная температура оказывается несколько выше экспериментальной, что может быть следствием погрешности расчёта, но может быть и следствием неточности измерений, вызванной высокой скоростью нагрева и другими факторами [1]. Поэтому актуальна задача исследования основных факторов, влияющих на инерционность температурного датчика, термопары (ТП), что служит целью данной работы. Для одного из экспериментов были выделены основные факторы, которые могут вызывать запаздывание нагрева ТП относительно измеряемой температуры. Они были приблизительно оценены, затем проводилось варьирование их величин в пределах оцененных диапазонов. Результатом расчётов служит скорость роста температуры оболочки твэла и ТП, находящейся в контакте с ней. Разность между этими температурами даёт оценку систематической ошибки измерения.

Для расчёта теплового режима была создана численная модель ТП в контакте с твэлом в их взаимодействии. Геометрия и расчётная сетка, моделирующие поперечное сечение, представлены на Рис.1:

Твэл моделируется как бесконечно длинная циркониевая трубка с внешним диаметром 0.9 см и внутренним 0.8 см, в котором находятся урановые таблетки (цилиндрический столб таблеток с идеальным тепловым контактом между ними) диаметра 0.75-0.8 см. Между топливным столбом и поверхностью циркониевой оболочки находится газовый зазор. ТП в чехле приближённо моделировалась как трехслойная структура – цилиндрический чехол (цирконий), внутри которого слой изолятора и металлический стержень, моделирующий спай и провода ТП. Внешний диаметр чехла 0.5мм.

Численный расчет производился в плоской 2D постановке. Рассматривалось поле температуры в двумерной области поперечного сечения твэла и ТП (Рис. 1). Имеются 3 области: ТП представлена полукругом с граничным условием симметрии, твэл – четвертью круга с граничным условием симметрии, контактный слой между ними представлен перемычкой между ТП и твэлом. ТП, контактный слой и твэл имеют конвективное граничное условие теплообмена с теплоносителем. Возможность неучёта нижней части твэла связана с малостью возмущения, вносимого ТП.

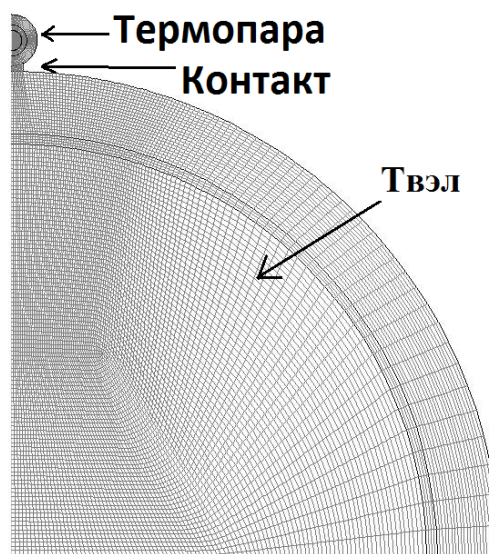


Рисунок 1. Расчетная сетка задачи.

Рассматривается перегрев твэла, что происходил в эксперименте [3] по разрушению твэла, вследствие ухода охлаждающего теплоносителя. Процесс расчета идет в два этапа. На первом рассчитывается стационарное распределение температуры охлаждаемого твэла при следующих параметрах: объемное тепловыделение урана в твэле = 40 МВт/м<sup>3</sup>, температура теплоносителя  $T_{\text{WATER}}=373\text{K}$ , коэффициент конвективного теплообмена с теплоносителем  $h = h_1=600 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ . При стационарном состоянии температура оболочки твэла равна  $T_{\text{оболочки}}=200^\circ\text{C}$ . Далее стационарное состояние берется начальным для расчета уже нестационарного процесса разогрева твэла при условии ухода теплоносителя, что моделируется понижением коэффициента теплообмена  $h$  до  $h_2=30 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ . В процессе всего расчета ведется запись температуры в центре термодатчика и на границе твэла, собственно, для оценки инерционности показаний термодатчика.

Были проведены три группы расчетов, получен ход нагрева рассматриваемой системы при разных параметрах задачи. В первой группе исследовалось влияние теплоёмкости самой термодатчика на запаздывание температуры в ней, во второй изучалось влияние теплопроводности контакта термодатчика с оболочкой твэла. В третьей группе были поставлены дополнительные граничные условия по теплообмену излучением на поверхности. Результаты численного моделирования сравнивались с данными по эксперименту [2,3].

В первой группе расчетов теплопроводность контакта берётся повышенной ( $\chi=10\text{Вт/м-К}$ ) и исследуется влияние теплоёмкости материала ТП (тепловая инерция). Расчеты показали, что отличие температур в центре термодатчика и на границе твэла пренебрежимо мало в течении всего разогрева вплоть до  $T_{\text{оболочки}}=1200\text{K}$  и составляет  $\Delta T < \sim 5\text{K}$  при табличных значениях теплофизических коэффициентов других материалов (теплоемкость варьировалась от 400Дж/кг-К до 900Дж/кг-К).

Во второй группе расчетов изучалось влияние теплопроводности контакта ТП и твэла. Коэффициент теплопроводности материала контакта варьировался от 5 Вт/м-К до 0.1 Вт/м-К (коэффициент хорошей теплоизоляции). Эта величина имеет большее влияние на разность температур термодатчика-твэл, чем теплоемкость самой термодатчика. Разность температур ТП и твэла медленно растет при общем росте температуры, она находится в обратной зависимости от коэффициента теплопроводности контакта и по порядку составляет десятки градусов. (Рис. 2,3,4,5 – расчеты с разными коэффициентами теплопроводности контакта между ТП и твэлом)

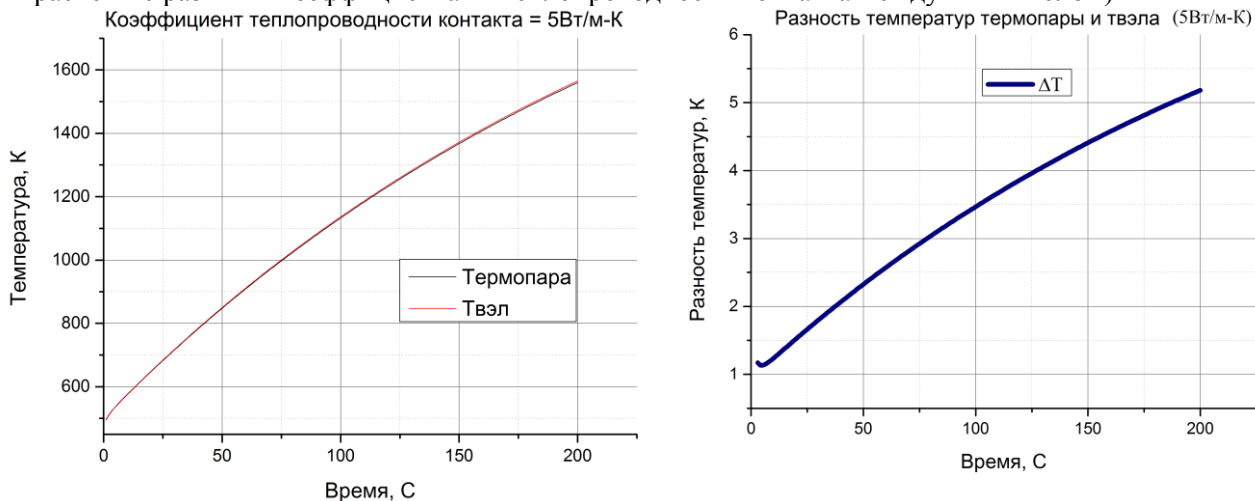


Рисунок 2. ( $\Delta T < 5\text{K}$ )

При коэффициенте теплопроводности контакта, равном 5 Вт/М-К температура ТП отстает от температуры твэла менее, чем на 5К.

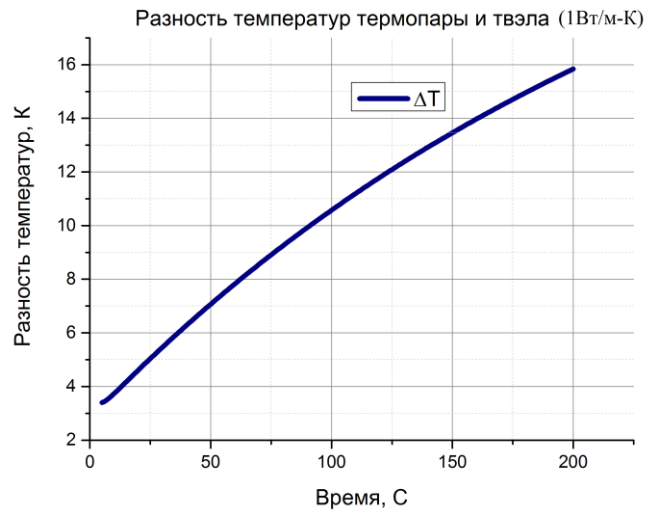
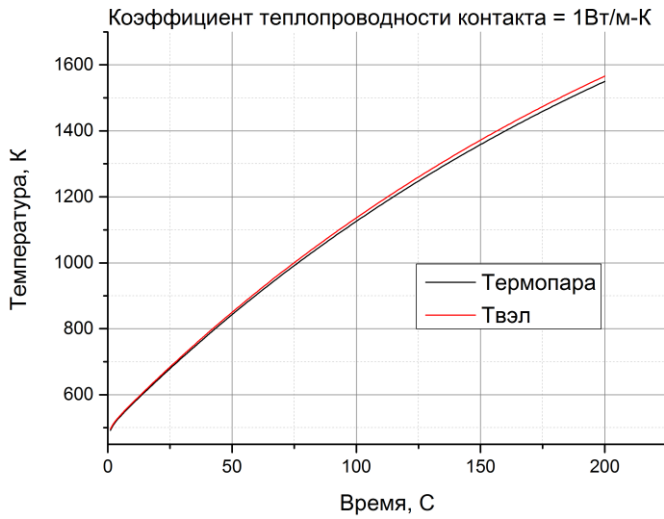


Рисунок 3. ( $\Delta T \sim 5-15K$ )

При коэффициенте теплопроводности контакта равном 1 Вт/М-К температура ТП отстает от температуры твэла на 5-10К.

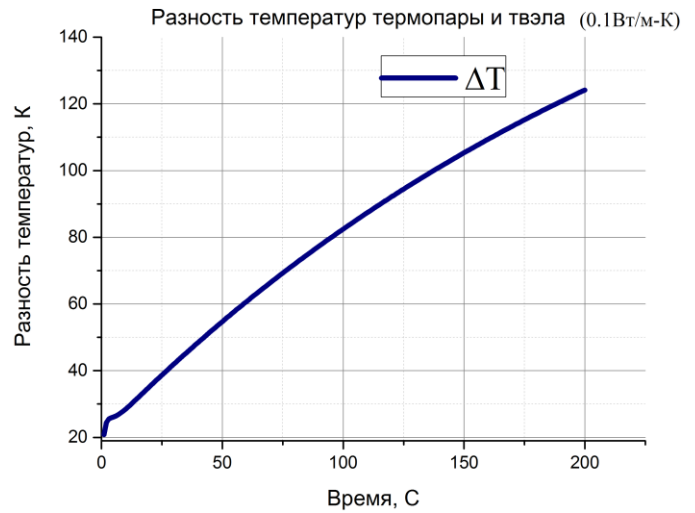
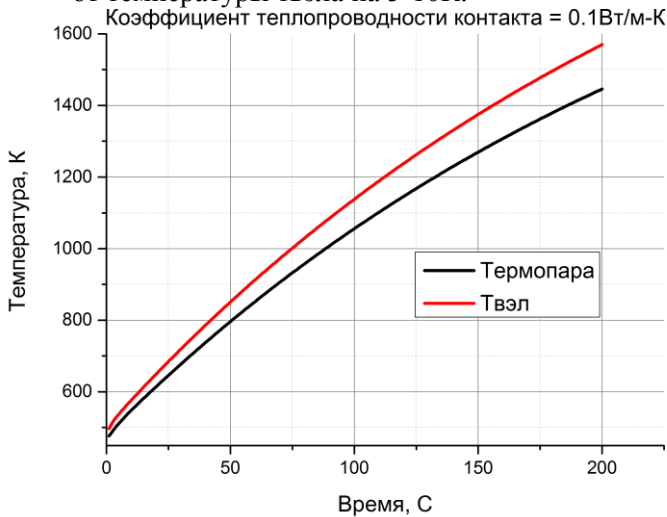


Рисунок 4. ( $\Delta T \sim 20-50K$ )

При коэффициенте теплопроводности контакта, равном 0,1 Вт/М-К температура ТП существенно отстает от температуры твэла на 20-100К.

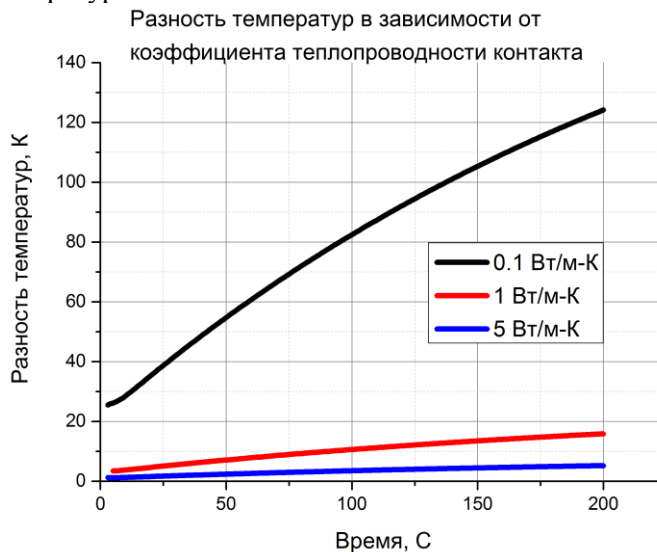


Рисунок 5. Сравнительный график, отображающий инерционность (разность температур ТП и твэла) при разных коэффициентах теплопроводности контакта.

Далее, если сравнить экспериментальные данные (Рис.6) и результаты расчетов первой и второй группы (Рис. 2,3,4), то можно заметить, что качественное поведение рассчитанных температур во времени отличается от экспериментального – наклон кривых в эксперименте убывает заметно быстрее. Поэтому в третьем расчете для учета этого теплового явления к конвективным граничным условиям добавляется граничное условие по теплообмену излучением -  $q_{radiative} = \varepsilon_{wall} \sigma T_{wall}^4$ , где :  $\varepsilon_{wall} = 0.8$  - степень черноты поверхности,  $\sigma$  - постоянная Стефана-Больцмана. Этот расчет показал результаты, более похожие на эксперимент, чем первые два (Рис. 6,7).

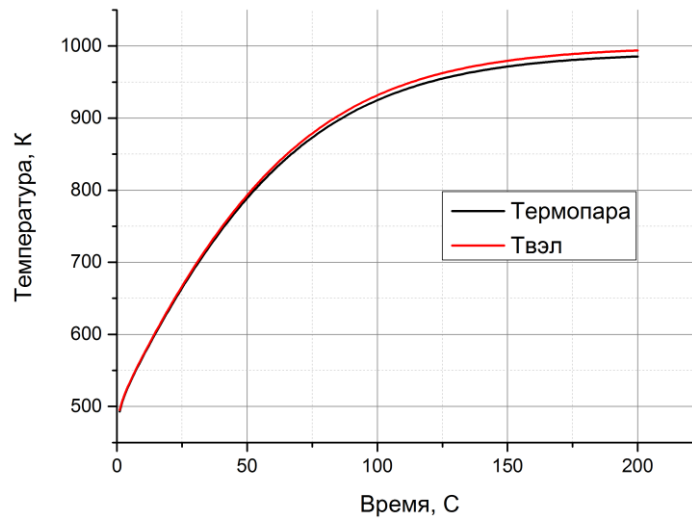
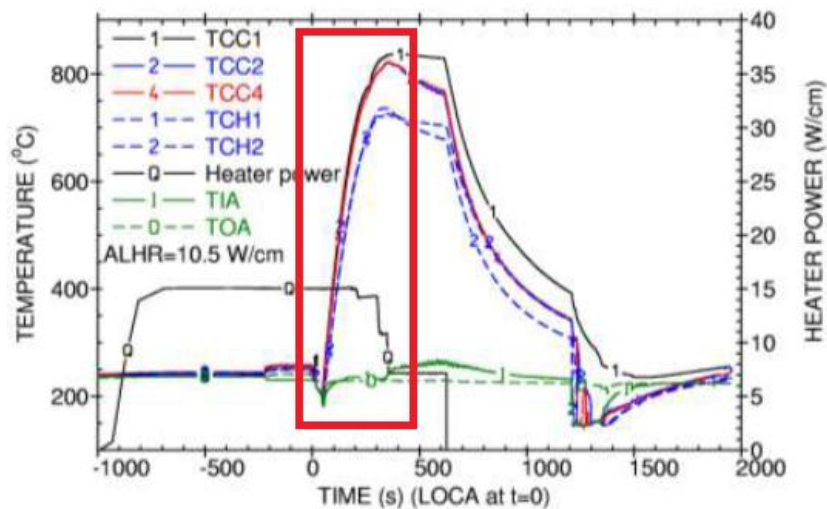


Рисунок 6. Температура твэла и термопары при добавлении граничного условия на теплообмен излучением (коэффициент теплопроводности контакта = 5Вт/м-К).



Cladding (TCC), heater (TCH), coolant inlet/ outlet (TIA/ TOA) temperatures, and heater power during IFA-650.3

Рисунок 7. Экспериментальные данные [2] по температуре. TCC1, TCC2, TCC4 – температуры термопар с оболочки твэла. Выделен красным интересный нас промежуток времени – нагрев твэла после потери теплоносителя. Как можно заметить, температура сначала даже падает, что является следствием интенсивного испарения теплоносителя, что остался на поверхности твэла. После, твэл быстро нагревается и в промежутке: 300-400с - начинается его разрушение. Нас же интересует промежуток времени: [50с;300с], где идет интенсивный рост температуры.

По результатам моделирования можно заключить, что отставание показаний термопары от твэла в основном зависит от теплопроводности контакта ТП с твэлом, а также от граничных условий по теплообмену со средой. В расчётах исследовался теплообмен излучением, но может влиять и коэффициент конвективного теплообмена, и испарение оставшейся воды. При этом получаемая

разность температур достигает 100К, в зависимости от величин параметров. Это необходимо учитывать при анализе эксперимента и уточнять значения неопределённых величин.

Литература:

- 1) Сорокин Д. Н., Джусов Ю. П. Динамические характеристики термопар - Обнинск : [б. и.], 1973. - 30 с. : ил.; 29 см. - (Препринт/ Физ.-энерг. ин-т; ФЭИ-364).
- 2) CSNI Report on Benchmark calculations on Halden IFA-650 LOCA test results, November 2010, NEA/CSNI/R(2010)6.
- 3) CSNI Report on Safety Significance of Halden LOCA Test Results, November 2010, NEA/CSNI/R(2010)5.