

УДК 621.039.517.5

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ИРТ-Т

Ю.Б. Чертков, А.А. Иванов, А.Г. Наймушин

Томский политехнический университет

E-mail: agn@tpu.ru

Приведены результаты теплофизических расчетов активной зоны реактора ИРТ-Т. Показано, что при номинальной мощности реактора температурные режимы твэлов укладываются в предельные значения и соответствуют требованиям технического обоснования безопасности.

Ключевые слова:

Реактор, тепловыделяющий элемент, тепловыделяющая сборка, теплоноситель, энерговыделение, температурное распределение, теплогидравлические параметры.

Key words:

Reactor, fuel element, fuel rod array, coolant, energy release, temperature distribution, term hydraulic parameters.

Активная зона исследовательского реактора ИРТ-Т оснащена только приборами, которые позволяют определять подогрев водяного теплоносителя и тепловую мощность реактора в целом. Определять распределение энерговыделения по ячейкам и твэлам реактора можно только с помощью программ нейтронно-физического расчета. В 2007 г. в ТПУ появилась относящаяся к типу прецизионных расчетная программа MSU5TPU, позволяющая определять распределение тепловыделения по объему реактора [1]. В 2008 г. университетом был приобретен программы теплофизического расчета [2], позволяющие на основе нейтронно-физических расчетов определять температурные поля в активной зоне реактора ИРТ-Т. Данный комплекс программ позволяет определять тепловые нагрузки и температурные режимы работы элементов конструкции активной зоны при заданном расходе, температуре и давлении теплоносителя.

Целью данной работы являлось изучение теплогидравлических параметров реактора ИРТ-Т [3] при номинальной мощности 6 МВт. Необходимо было оценить плотность потока тепла с поверхности твэлов, распределение температуры по твэлам и сборкам реактора и соответствие предельно-допустимым значениям. С этой точки зрения достаточно было определить только теплофизические параметры наиболее энергонапряженных сборок реактора.

Актуальность данной работы связана с планируемым повышением мощности реактора ИРТ-Т до мощности 10...12 МВт и необходимостью оценки теплофизических параметров работы твэлов на этой мощности.

В работе были использованы специализированные программы: ТГРК (ТеплоГидравлический Расчет Канала), FELM (Расчет теплогидравлических параметров активных зон ядерных энергетических установок) и MSU5TPU. ТГРК предназначена для расчета температуры стенок твэла и теплоносителя по сечению и длине ТВС типа реактора ИРТ-Т, имеющих цилиндрическую форму. Программа

FELM предназначена для уточнения расчетов распределения температур по сечению твэлов. Необходимые для расчета теплофизические параметры материалов реактора были взяты из работ [4, 5].

Сердечник твэла реактора ИРТ-Т представляет собой дисперсионную композицию из двуокиси урана в алюминиевой матрице. Объемная доля топливной компоненты в сердечнике составляет 7,1 %. Коэффициент теплопроводности топливной композиции определялся по формуле Одолевского [6] и при такой доле топлива в сердечнике теплопроводность сердечника снижается по сравнению с теплопроводностью алюминиевой матрицы на 10 %. Теплопроводность алюминия зависит от его чистоты и доходит до 236...247 Вт/(м·К), но в расчетах было принято несколько заниженное (консервативное) значение – 220 Вт/(м·К). В диапазоне рабочих температур 50...80 °С значение теплопроводности практически не изменяется.

По заданным картограммам загрузки реактора с помощью программы MSU5TPU были оценены распределения энерговыделения по объему реактора и определены коэффициенты неравномерности тепловыделения по твэлам и ячейкам реактора. В рамках этой работы создана расчетная модель этого реактора и проведены оценочные расчеты распределений энерговыделения по сечению и длине наиболее энергонапряженных сборок.

На рис. 1 показаны результаты распределения энерговыделения (мощности, в относительных единицах) по ячейкам активной зоны.

Расчетное значение коэффициента неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны равно $K_z=1,31$.

На рис. 2 показано распределение энерговыделения по высоте активной зоны.

Распределение энерговыделения по горизонтальному сечению наиболее напряженной среды восьмитрубных ТВС показано на рис. 3.

Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения по горизонтальному сечению на-

и более напряженной восьмитрубной ТВС (ячейка № 10) равен $K_r^8=1,4$.

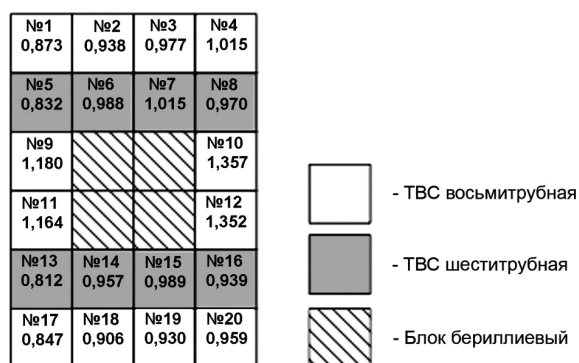


Рис. 1. Распределение энерговыделения по ячейкам реактора (нормировано на среднее значение)

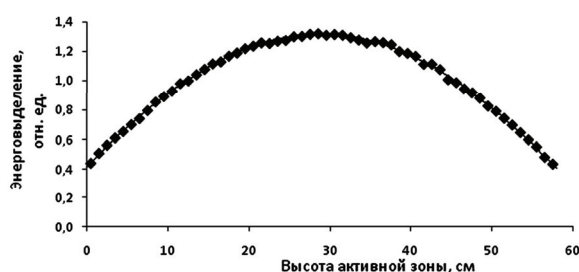


Рис. 2. Распределение энерговыделения (расчет) по высоте активной зоны реактора ИРТ-Т (нормировано на среднее значение)

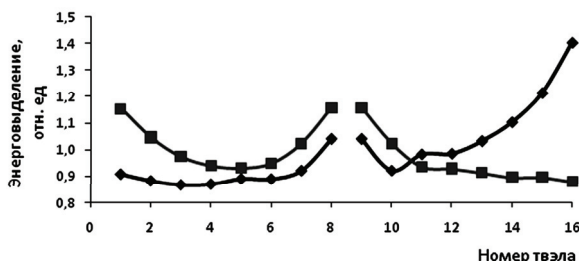


Рис. 3. Распределение энерговыделения (расчет) по горизонтальному сечению восьмитрубной ТВС (нормировано на среднее значение) в направлении: \blacklozenge – от отражателя к центру реактора; \blacksquare – между соседними ТВС

Распределение энерговыделения по горизонтальному сечению наиболее напряженной шеститрубной ТВС, находящейся в ячейке № 13, показано на рис. 4.

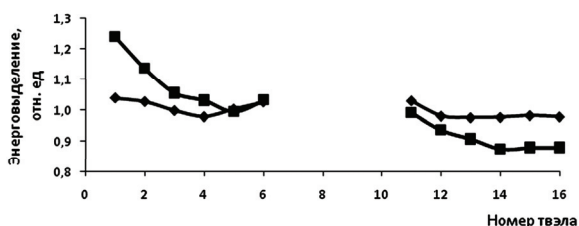


Рис. 4. Распределение энерговыделения (расчет) по горизонтальному сечению шеститрубной ТВС (нормировано на среднее значение) в направлении: \blacksquare – к центру реактора; \blacklozenge – между соседними ТВС

Коэффициент неравномерности энерговыделения по горизонтальному сечению наиболее напряженной шеститрубной ТВС равен $K_r^6=1,24$.

Таким образом, максимальные удельные мощности восьми- и шеститрубной ТВС соответственно равны:

$$w_8^{\max} = w_8 K_z K_r^8 = 1,0004 \cdot 1,31 \cdot 1,4 = 1,846 \text{ кВт/см}^2,$$

$$w_6^{\max} = w_6 K_z K_r^6 = 0,8399 \cdot 1,31 \cdot 1,24 = 1,123 \text{ кВт/см}^2,$$

Полученные оценки распределений энерговыделения для номинального уровня мощности реактора ИРТ-Т 6 МВт для шести- и восьмитрубной ТВС были использованы для оценки температурных режимов работы наиболее энергонапряженных ТВС.

Вместо всей активной зоны были рассмотрены цилиндризованные (из условия сохранения площадей и материального состава ТВС) коаксиальные сборки твэлов. Для расчетов были выбраны две ТВС с наибольшим энерговыделением. Это восьми- и шеститрубная ТВС с относительным энерговыделением 1,357 и 0,812. Мощности, выделяемые в этих ТВС, составляют:

$$N_8 = 300 \cdot 1,357 = 407,1 \text{ кВт},$$

$$N_6 = 300 \cdot 0,812 = 243,6 \text{ кВт}.$$

Удельная мощность топлива восьми- и шеститрубной ТВС:

$$w_8 = \frac{N_8}{V_8} = \frac{407,1}{406,928} = 1,0004 \text{ кВт/см}^2,$$

$$w_6 = \frac{N_6}{V_6} = \frac{243,6}{353,22} = 0,6896 \text{ кВт/см}^2.$$

Результаты расчета показывают, что максимальная температура поверхности твэла в наиболее энергонапряженном участке, а именно, на внутренней стенке наружного твэла, для восьмитрубной ТВС, находящейся в ячейке № 10, составляет $80,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Для шеститрубной ТВС, находящейся в ячейке № 13 – $67,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная температура сердечника твэла восьмитрубной ТВС составляет $82,1 \text{ }^\circ\text{C}$, а шеститрубной – $68,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Максимальная температура на границе сердечника с оболочкой восьмитрубной ТВС равна $81,7 \text{ }^\circ\text{C}$, а для шеститрубной – $68,3 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура теплоносителя на выходе из зазора, прилегающего к внутренней поверхности наружного твэла, составляет $59,6$ и $54,1 \text{ }^\circ\text{C}$ для восьми- и шеститрубной ТВС соответственно. Максимальная плотность теплового потока с поверхности твэла составляет $518,3$ и $314,8 \text{ кВт/м}^2$ для восьми- и шеститрубной ТВС соответственно. Именно для этих двух участков был проведен уточняющий расчет распределения температур в твэле в программе FELM, рис. 5, 6.

Максимальные температуры по сечению в наиболее энергонапряженных участках равны: для восьми- и шеститрубной ТВС – $80,7 \text{ }^\circ\text{C}$, а для шеститрубной – $66,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

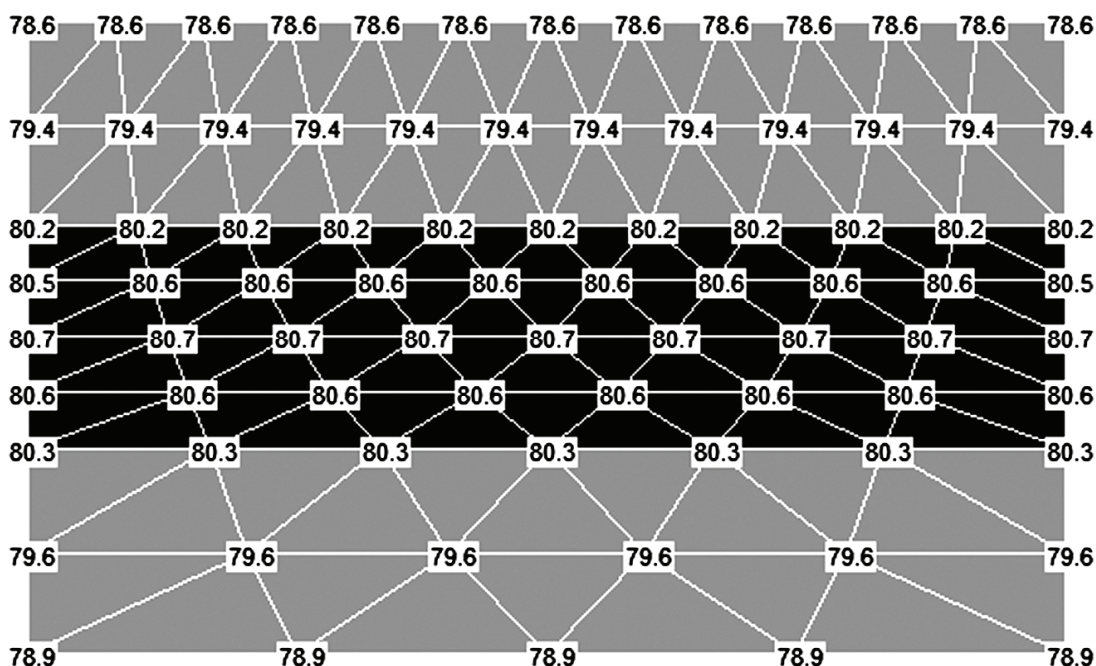


Рис. 5. Распределение температур в наружном твэле восьмитрубной ТВС в ячейке № 10 (черной заливкой показан сердечник твэла, серой – его оболочка)

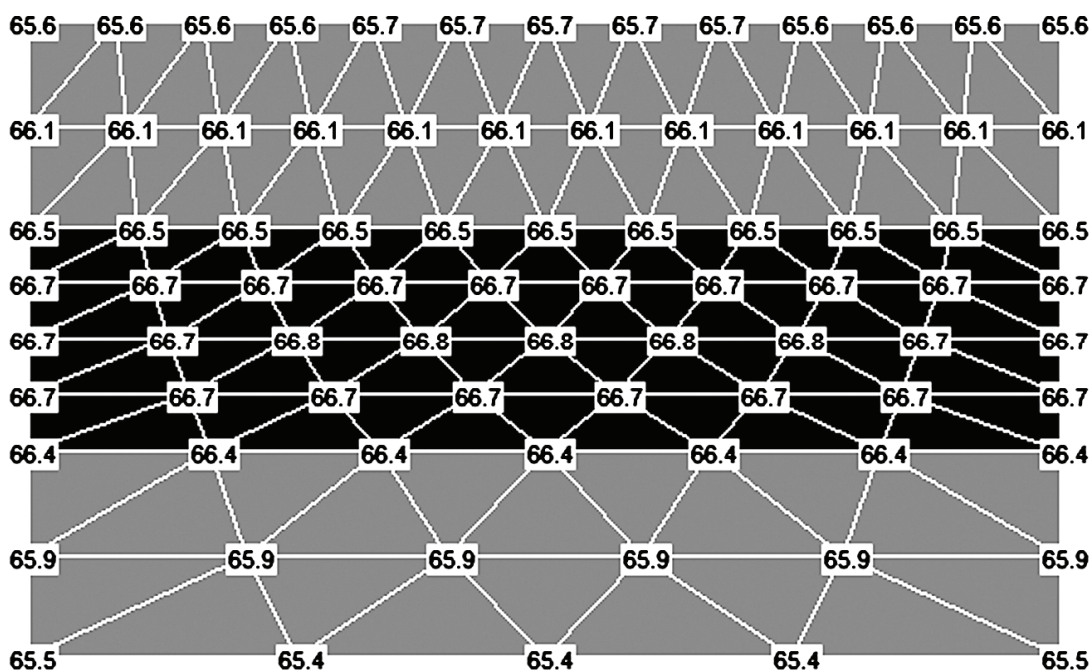


Рис. 6. Распределение температур в наружном твэле шеститрубной ТВС в ячейке № 13

Распределения температуры теплоносителя по высоте наиболее напряженной восьмитрубной ТВС в ячейке № 10 и наименее напряженной шеститрубной ТВС в ячейке № 13 (рис. 1) в самом подогреваемом зазоре, между первым (наружным) и вторым твэлом имеют вид, рис. 7.

Максимальные подогревы теплоносителя в зазорах этих ТВС при мощности 6 МВт будут:

$$\Delta t_8^{\max} = t_8^{\text{вн}} - t_8^{\text{вн}} = 59,6 - 45 = 14,6 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_6^{\max} = t_6^{\text{вн}} - t_6^{\text{вн}} = 54,5 - 45 = 9,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Распределения температур по высоте на внутренней поверхности наружных твэлов этих ТВС имеют следующий вид, рис. 8.

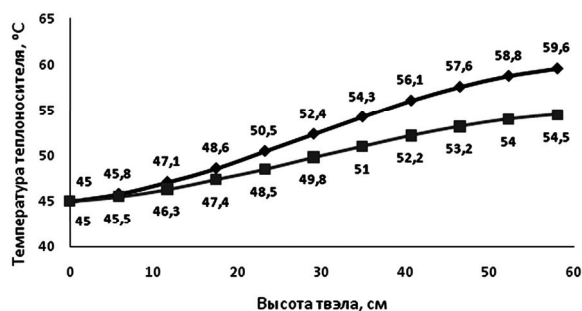


Рис. 7. Распределения температуры теплоносителя по высоте наиболее напряженной восьмитрубной ТВС (◆) в ячейке № 10 и наименее напряженной шеститрубной ТВС (■) в ячейке № 13

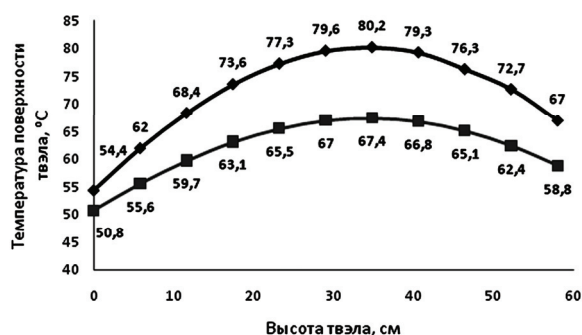


Рис. 8. Распределения температур по высоте на поверхности твэла шеститрубной (■) и восьмитрубной (◆) ТВС в ячейках № 13 и № 10 соответственно

Плотности тепловых потоков с поверхности твэлов данных ТВС распределены по высоте следующим образом, рис. 9.

Одним из эксплуатационных ограничений на работу реактора является условие недопущения поверхностного кипения теплоносителя на твэлах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Н.И., Гомин Е.А., Городков С.С. Программа MCUSTPU // РИЦ «Курчатовский институт» Институт ядерных реакторов, – М., 2007. URL: <http://mcu.ver.kiae.ru/about.html> (дата обращения: 15.02.2010).
- Грачев В.Д. Некоторые вопросы математической реализации метода конечных элементов в задачах реакторной теплофизики: Препринт НИИАР-6(652). – М.: ЦНИИатоминформ, 1985. – 21 с.
- Варлачев В.А., Гусаров О.Ф., Заболотнов С.А. и др. Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – 56 с.

Температура начала поверхностного кипения равна 123 °C. Полученное в данной работе значение температуры поверхности твэлов не превышает 81 °C, что гораздо ниже предельного значения.

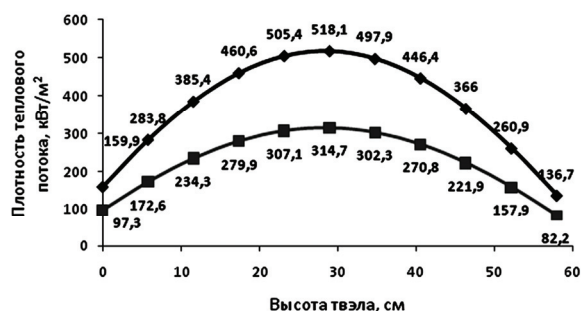


Рис. 9. Плотности тепловых потоков с поверхности твэлов шеститрубной (■) и восьмитрубной (◆) ТВС в ячейках № 13 и № 10 соответственно

Выводы

С помощью программ MCUSTPU, ТГРК и FELM отработана методика определения энергетических и теплофизических характеристик реактора ИРТ-Г, проведен расчет температурных режимов работы его твэлов. Получено детальное распределение температурных полей в объеме ядерного реактора. Показано, что при номинальной мощности реактора ИРТ-Г (6 МВт) температурные режимы работы твэлов укладываются в предельные значения и соответствуют требованиям безопасности эксплуатации реактора. Максимальные температуры поверхности твэлов и их сердечников при мощности реактора 6 МВт не превышают 81 °C. Максимальный подогрев теплоносителя в зазорах между твэлами – 15 °C, а максимальная плотность теплового потока с поверхности твэла – 518 кВт/м².

- Кирилов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
- Кирилов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
- Оделевский В.И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // Журнал технической физики. – 1951. – Т. 21. – № 6. – С. 667–685.

Поступила 23.03.2010 г.