

Теплоэнергетика

УДК 621.039.517

ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ИВГ.1М ПРИ КОНВЕРСИИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ НА ТОПЛИВО ПОНИЖЕННОГО ОБОГАЩЕНИЯ

И.В. Прозорова, Д.И. Гановичев, Е.А. Киричек

Институт атомной энергии Национального ядерного центра, г. Курчатов, Казахстан

E-mail: Prozorova@nnc.kz

Рассмотрены тепло-гидравлические условия работы конверсионной активной зоны реактора ИВГ.1М. Приведены результаты оценок основных теплофизических и гидравлических параметров активной зоны. Сделан вывод о том, что для реактора ИВГ.1М с высокообогащенным и низкообогащенным ураном тепловое состояние реактора практически не зависит от обогащения топлива при одинаковых конструкционных особенностях тепловыделяющих сборок.

Ключевые слова:

Реактор ИВГ.1М, активная зона, технологические каналы, твэлы, низкообогащенное топливо, тепло-гидравлические расчеты.

Key words:

Reactor IVG.1M, active zone, process channels, fuel elements, low-enriched fuel, thermo-hydraulic calculations.

Концепция модернизации активной зоны реактора

В результате предварительного анализа возможности создания реактора ИВГ.1М [1] с топливом низкого обогащения (НОУ) был выбран вариант, в котором используются водоохлаждаемые технологические каналы (ВОТК-НОУ) той же конструкции, что и водоохлаждаемые технологические каналы с высокообогащенным ураном (ВОТК-ВОО), но с повышенной загрузкой урана в топливной матрице. В этом случае конструкция реактора остается неизменной и реактор ИВГ.1М-НОУ остается исследовательским водо-водяным гетерогенным корпусным ядерным реактором на тепловых нейтронах с легководяными теплоносителем и замедлителем и бериллиевым отражателем нейтронов. Активная зона реактора содержит 30 водоохлаждаемых технологических каналов. В центральной ячейке реактора расположен окруженный бериллиевым вытеснителем петлевой канал, в который возможна установка экспериментального устройства.

Целью исследований являлось расчетное изучение теплофизических эффектов, вызванных конверсией реактора ИВГ.1М на топливо пониженного обогащения, определение теплофизических условий работы конверсионной активной зоны. При этом решались следующие задачи:

- разработка расчетно-методического обеспечения и его тестирование;
- проведение расчетных исследований существующей и конверсионной активных зон реактора;
- сравнение теплофизических характеристик существующей и конверсионной активных зон реактора.

Программно-методическое обеспечение расчетов

Для расчета теплофизических характеристик и его тестирования использовалась программа Mathcad [2].

В процессе теплового и гидравлического расчетов определялось распределение температуры охлаждающей воды по высоте активной зоны реактора в межканальном пространстве и в технологических каналах реактора, распределение температуры стенки технологического канала, температуры оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов), максимальной температуры твэлов по высоте активной зоны, давлений по трактам теплоносителя.

В качестве основных исходных данных для проведения расчетов задавались:

- тепловая мощность реактора;
- давление и расход воды в раздаточном коллекторе установки;

- относительное распределение энерговыделения в твэлах по высоте активной зоны и по рядам технологических каналов.

Методика расчетов не учитывает области температуры и давления, когда в трактах установки может возникнуть кипение воды или появиться перегретый пар.

Тестирование расчетной методики было проведено для проверки ее работоспособности и сравнения с результатами экспериментов, т. к. с ее помощью предстояло определять параметры вариантов модернизированной активной зоны и сравнивать их с параметрами существующей. Для исключения случайных погрешностей при поиске оптимального варианта модернизированной активной зоны необходимо использовать одну и ту же методику.

В качестве исходных значений для расчета параметров технологического канала приняты результаты, полученные во время эксперимента П-06-02, проведенного 07.03.2006 г., во время которого мощность реактора ИВГ.1М на одном из режимов составляла 10 МВт (Обычный режим мощности реактора на пусках от 1 до 6 МВт). В табл. 1 приведены теплофизические параметры активной зоны ИВГ.1М с экспериментальными и расчетными значениями.

Таблица 1. Теплофизические параметры активной зоны ИВГ.1М

Параметр	Эксперимент			Расчет		
	I ряд	II ряд	III ряд	I ряд	II ряд	III ряд
Тепловая мощность канала, МВт	0,382	0,370	0,304	0,396	0,371	0,262
Средний расход воды через ВОТК, кг/с	2,09	2,11	1,94	2,10	2,10	1,80
Средняя температура воды на выходе из ТК, °С	56,7	54,9	50,7	59,0	56,0	49,0
Тепловая мощность реактора ИВГ.1М, МВт	10,0			10,0		
Суммарный расход воды через тракты охлаждения реактора, кг/с	65,5			65,5		
Температура воды на входе в реактор, °С	13,0			13,0		

Было проведено сравнение экспериментальных x_1 и рассчитанных x_2 значений:

$$R = (|x_1 - x_2| / x_1) \cdot 100 \%,$$

где R – среднестатистическая погрешность.

Максимальная относительная погрешность составила 0,16 %.

Полученные результаты можно считать достоверными, так как среднестатистические погрешности вычислений меньше 1 %, относительная погрешность между экспериментом и вычислениями составила 0,16 %. Это говорит о корректности использования методики расчета реактора ИВГ.1М для теплофизических расчетов.

Методика проведения расчетов

В ходе теплофизических расчетов определялось распределение температуры в конструкционных

материалах технологических каналов тепловыделяющих сборок и охлаждающей воды. Активная зона реактора состоит из 30 технологических каналов. В связи с тем, что основное энерговыделение в реакторе происходит в технологических каналах, для расчета параметров реактора при соответствующей мощности необходимо рассчитать теплофизические параметры технологического канала.

Особенностью данной методики являлось то, что в первую очередь на основе распределений энерговыделения, полученных по данным нейтронно-физических расчетов, был проведен расчет распределения мощности по высоте технологического канала. Затем проводился расчет распределения температуры охлаждающей воды и конструкционных материалов тепловыделяющей сборки по высоте активной зоны реактора. Расчет выполнялся методом последовательных приближений. Модель тепловыделяющей сборки по высоте разбивалась на ряд расчетных участков (~100), затем выполнялся расчет температуры воды и конструкционных элементов ТК расчетного участка. Процесс повторялся далее, при этом полученные в результате расчета значения температуры использовались в качестве исходных данных при расчете следующего участка.

При расчете распределения мощности по высоте ТК зависимость мощности, выделяемой технологическим каналом i -го ряда, от высоты активной зоны реактора определялась следующим выражением:

$$Q_i(x) = \frac{N \varepsilon_i \text{profile}_i(x)}{n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + n_3 \varepsilon_3} m_i;$$

$$m_i = L_i / \int_0^{L_i} \text{profile}_i(x) dx,$$

где n_1, n_2, n_3 – количество каналов в первом, втором и третьем рядах соответственно; ε_i – величина относительного распределения энерговыделения в i -м ряду, $i=1,2,3$; $\varepsilon_1=1,524$; $\varepsilon_2=1,420$; $\varepsilon_3=1,000$; N – мощность реактора, Вт; $\text{profile}_i(x)$ – функция, аппроксимирующая профиль относительного энерговыделения по высоте, определенная по данным нейтронно-физических расчетов в i -том ряду, $i=1,2,3$; m_i – коэффициент, учитывающий значение площади под кривой относительного энерговыделения в i -м ряду, $i=1,2,3$; $m_1=1,441$; $m_2=1,546$; $m_3=1,653$; L_i – длина ТВС, м.

На рис. 1 приведено распределение энерговыделения в МВт по длине для трёх рядов реактора, определённое по данным нейтронно-физических расчетов при мощности реактора 10 МВт для ИВГ-НОУ и ИВГ-ВОУ.

Далее в программе автоматического проектирования и расчета MathCAD был произведен расчет распределения температуры воды в тракте охлаждения ТВС, в межканальном пространстве, а также температуры конструкционных материалов водоохлаждаемого технологического канала.

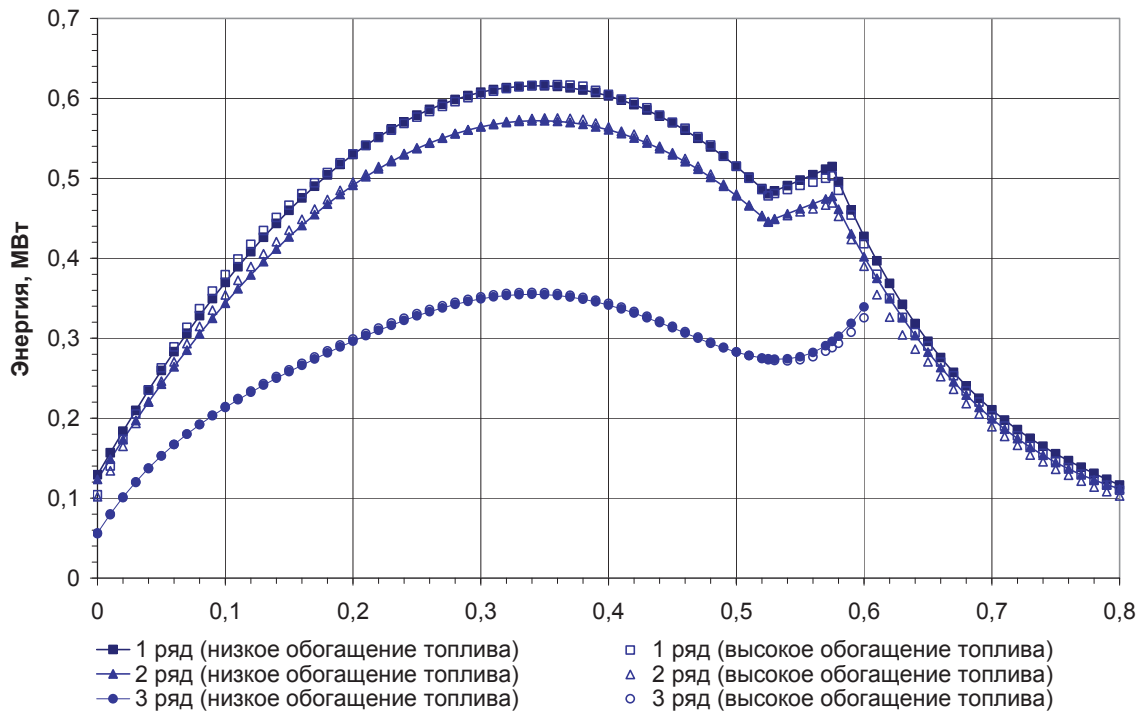


Рис. 1. Мощность, выделяемая в ТК, в зависимости от ряда ТК и высоты активной зоны реактора для ИВГ-ВОУ и ИВГ-НОУ

Расчетная схема технологического канала, использованная при расчете, представлена на рис. 2.

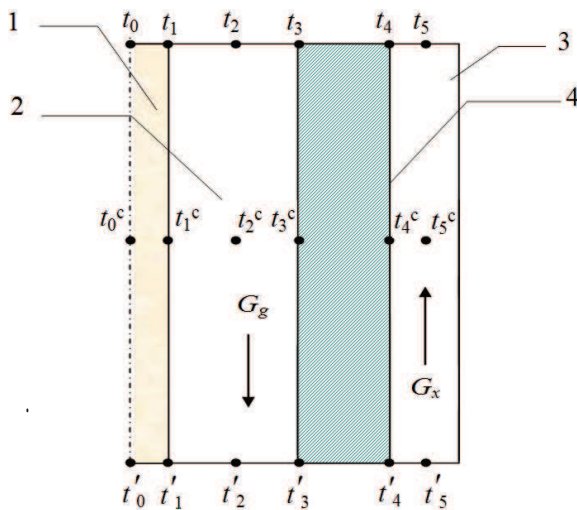


Рис. 2. Расчетная схема водоохлаждаемого канала: 1 — твэл; 2 — вода внутри канала; 3 — стенка ТК; 4 — межканальное пространство активной зоны

На рис. 2 стрелками показано направление течения воды. Вода, охлаждающая конструкцию реактора и внешней поверхности стенок ВОТК, из раздаточного коллектора, расположенного в основании реактора, движется вверх. В верхней части каждый технологический канал имеет по 4 щелевых окна, через которые вода поступает в ВОТК, охлаждает тепловыделяющую сборку и затем, пройдя по всей длине технологического канала вниз, сливается из реактора.

Для учета неравномерности энергоснабжения по высоте активной зоны реактора модель ТВС по высоте разбивалась на ряд расчетных участков, при этом предполагалось, что в пределах одного расчетного участка энергоснабжение неизменно. Выполнялся расчет температуры воды и конструктивных элементов ТК для текущего расчетного участка. Полученные в результате расчета значения температуры использовались в качестве исходных данных при расчете следующего участка.

Система уравнений, описывающая математическую модель ВОТК, расчетная схема которой представлена на рис. 2, имела вид [3]:

$$\begin{cases} Q_{\text{ТВС}} = G_g C_p (t'_2 - t'_1) + \alpha_g F_g (t'_2 - t'_3); \\ \frac{G_x C_p (t'_5 - t'_4)}{30} = \alpha_x F_x (t'_4 - t'_5); \\ \alpha_g F_g (t'_2 - t'_3) + q_g V = \alpha_x F_x (t'_4 - t'_5); \\ t'_3 - t'_4 = \frac{q_g r_1^2}{4\lambda_{\text{стенки}}} \left(\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 2 \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - 1 \right), \end{cases}$$

где $Q_{\text{ТВС}}$ — мощность, выделяемая в ТК, Вт; α_x, α_g — коэффициенты теплоотдачи от внешней и от внутренней поверхности стенки ТК в охлаждающую воду Вт/(м²·°C); C_p — удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C) [4]; $\lambda_{\text{стенки}}$ — коэффициент теплопроводности стенки ТК, Вт/(м·°C); G_x, G_g — расход воды в межканальном пространстве реактора и в технологическом канале, кг/с; F_x, F_g — площадь внешней и внутренней поверхностей стенки ТК, м²; q_g — удельное энерговыделение в стенке ТК, Вт/м³; V — объем стенки, м³; t'_2, t'_3, t'_4, t'_5 — среднее значение темпера-

туры воды в ТК, внутренней поверхности стенки ТК, внешней поверхности стенки ТК и воды в межканальном пространстве соответственно, °C; t_2 , t_3 , t_2' , t_3' – температура воды в ТК на входе в расчетный участок, в межканальном пространстве в начале расчетного участка, в ТК на выходе из расчетного

участка и в межканальном пространстве в конце расчетного участка соответственно, °C.

Расчет распределения температуры охлаждающей воды и конструкционных материалов ТВС по высоте активной зоны реактора выполнялся методом последовательных приближений. Канал раз-

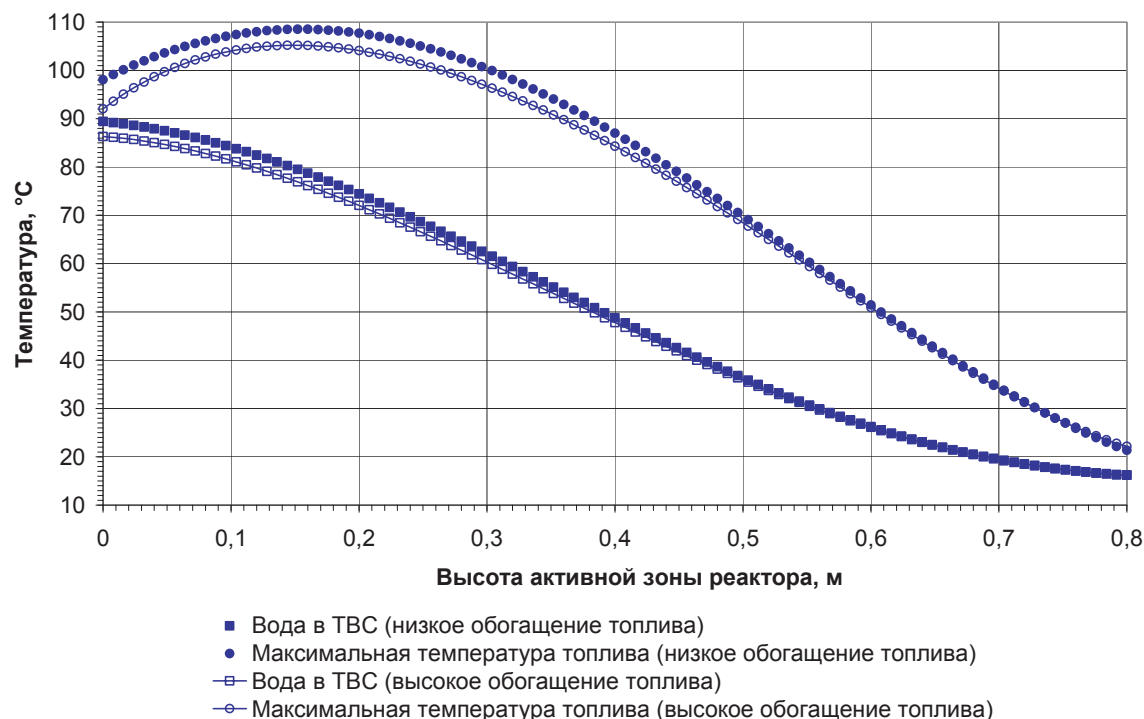


Рис. 3. Расчетное распределение максимальной температуры топлива и температуры охлаждающей воды первого ряда ТК по высоте активной зоны реактора

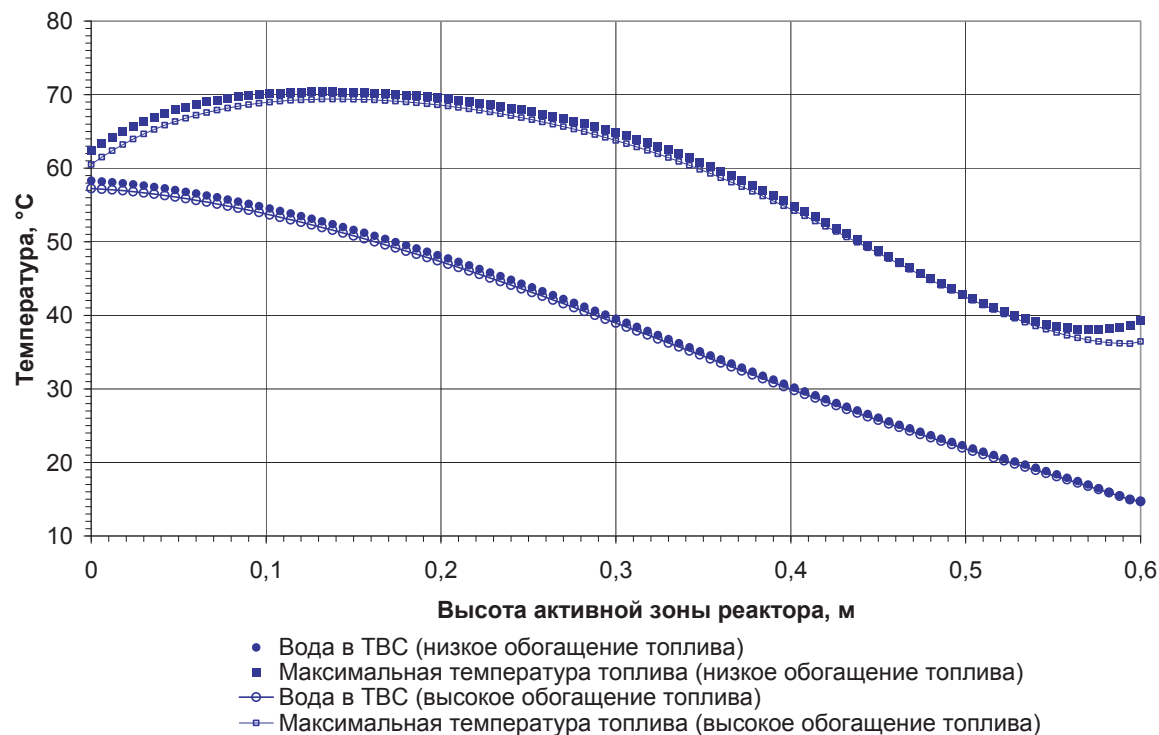


Рис. 4. Расчетное распределение максимальной температуры топлива и температуры охлаждающей воды третьего ряда ТК по высоте активной зоны

бывался на ряд расчетных участков. В первом приближении температура воды на входе в ТВС задавалась равной температуре воды из раздаточного коллектора t_{kol} . Далее выполнялся расчет температуры воды и конструктивных элементов ТК в конце первого расчетного участка. Полученные в результате расчета значения температуры t_i использовались в качестве исходных данных при расчете t_{i+1} следующего участка. Расчет ТК производился «сверху вниз». В конце последнего расчетного участка температура воды t_n в межканальном пространстве сравнивалась снова с температурой воды в раздаточном коллекторе t_{kol} . Если величина $(t_{kol} - t_n)$, определяющая точность расчетов, была неудовлетворительной, то температура воды на входе в ТВС увеличивалась на $0,05^\circ\text{C}$ и процесс повторялся, иначе расчет считался завершенным.

В ходе расчетов были получены следующие результаты. На рис. 3 и 4 приведено расчетное распределение максимальной температуры топлива и температуры в охлаждающей воде и конструктивных материалах ТК первого ряда и третьего по высоте активной зоны при мощности реактора 10 МВт для реакторов с ВОУ (высокообогащенным ураном) и НОУ (низкообогащенным ураном).

В табл. 2 приведены результаты вычисления абсолютной максимальной температуры в технологических каналах реактора. Важно отметить, что вычисления максимального значения температуры воды, оболочки твэла и топлива в ТК выполнены по вышеприведенному алгоритму в предположении, что все твэлы рассчитываемого технологического канала имеют мощность, равную мощности наиболее теплонапряженного «горячего» твэла в ТК по данным нейтронно-физических расчетов.

Предварительный анализ результатов тепловых расчетов для реактора ИВГ.1М с ВОУ и НОУ показывает, что тепловое состояние реактора мало зависит от обогащения топлива. В частности, параметры твэлов для реакторов с ВОУ и НОУ с максимальным энерговыделением отличаются менее чем на 4 %.

Сравнивая результаты тепловых расчетов для реакторов с ВОУ и НОУ, можно отметить следующее:

- максимальная расчетная температура топлива при проектной мощности реактора 60 МВт в ВОТК-НОУ составляет $244,1^\circ\text{C}$, что незначительно превышает максимальное расчетное значение температуры топлива ($234,9^\circ\text{C}$) в ВОТК-ВОУ;
- максимальная расчетная температура топлива при мощности реактора 10 МВт в ВОТК-НОУ составляет $108,5^\circ\text{C}$, что незначительно превышает максимальное расчетное значение температуры топлива ($105,2^\circ\text{C}$) в ВОТК-ВОУ;
- максимальная расчетная температура топлива при мощности реактора 33,9 МВт в ВОТК-НОУ составляет $183,3^\circ\text{C}$, что незначительно превышает максимальное расчетное значение температуры топлива ($177,1^\circ\text{C}$) в ВОТК-ВОУ;
- при мощности реактора 10 МВт максимальная расчетная температура поверхности оболочки твэла с НОУ составляет $100,9^\circ\text{C}$, что ниже максимальной эксплуатационной температуры, которая равна 110°C .

На завершающем этапе был проведен гидравлический расчет параметров реактора. В ходе расчетов были получены следующие результаты: тепловое состояние реакторов с разным топливом (ВОУ и НОУ) является практически одинаковым, их гидравлические характеристики, как это показано ниже, тоже совпадают.

В качестве исходных данных для расчета гидравлических параметров реактора ИВГ.1М приняты:

- давление воды в коллекторе на входе в тракты охлаждения реактора, МПа 1,09;
- среднее давление воды на выходе из ТК, МПа:
для первого ряда 0,91;
для второго и третьего рядов 0,92;
- средний расход воды через ВОТК-НОУ, кг/с:
для первого ряда 2,09;
для второго ряда 2,11;
для третьего ряда 1,94.

Перепад давления воды в межканальном пространстве при использовании насосной системы подачи (обеспечивающей суммарный расход воды через тракты охлаждения реактора равный $67,7$ кг/с) составит $\sim 0,052$ МПа, а суммарный перепад давления от коллектора до входа в тракт ох-

Таблица 2. Результаты расчета максимальных параметров технологических каналов для реакторов с ВОУ/НОУ

Номер ряда ТК	Тепловая мощность реактора, МВт	Расход воды, кг/с		Температура воды, $^\circ\text{C}$		Максимальная температура, $^\circ\text{C}$		Макс. значение плотности теплового потока через оболочку твэла, МВт/м ²
		в ТК	через реактор	вход в реактор	выход из ТВС	поверхности оболочки твэла	топлива	
1	10	2,09	67,3	13	86,3/89,4	97,7/100,9	105,2/108,5	0,289/0,298
2		2,11			82,6/79,0	94,3/89,8	100,6/95,5	0,269/0,259
3		1,94			57,2/58,3	65,4/66,5	69,4/70,4	0,183/0,191
1	33,9	5,20	151	20	120,3/124,6	151,3/152,6	177,1/183,3	0,953/1,010
2		5,20			116,2/111,2	145,8/138,8	170,5/161,9	0,913/0,878
3		4,60			83,4/85,0	103,4/105,4	120,2/121,6	0,630/0,648
1	60	7,94	230	20	136,3/141,2	186,5/186,2	234,9/244,1	1,69/1,790
2		7,94			131,5/125,7	179,5/171,0	225,9/214,5	1,62/1,550
3		6,83			95,6/97,4	128,5/130,6	160,0/162,1	1,11/1,150

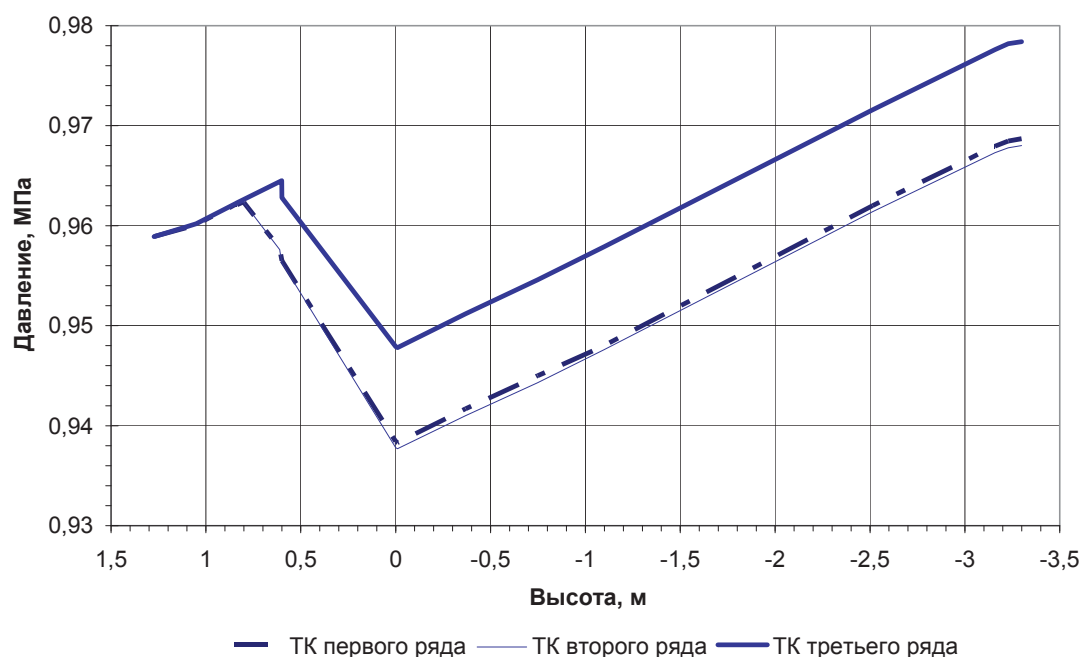


Рис. 5. Изменение давления воды по высоте технологических каналов реактора

давления ТК с учетом высоты столба воды будет равен $\sim 0,132$ МПа, поэтому давление воды на входе в тракт охлаждения ТК будет равен 0,958 МПа.

Результаты расчета перепада давления в трактах охлаждения ТК 1-го, 2-го и 3-го рядов показаны на рис. 5, где нулевое значение высоты соответствует нижнему торцу ТВС.

Выводы

В ходе расчетных исследований по обоснованию теплофизических характеристик при конверсии активной зоны реактора ИВГ.1М на топливо пониженного обогащения:

- создана расчетная методика для оценки теплофизических параметров работы реактора;
- проверена достоверность результатов, сделана оценка среднестатистических погрешностей вычислений;
- получены, систематизированы и проанализированы теплофизические характеристики активной зоны реактора ИВГ.1М с топливом высокого и пониженного обогащения;
- показано, что тепловое состояние реактора практически не зависит от обогащения топлива при одинаковых конструктивных особенностях ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айтхожин Э.С., Аринкин Ф.М., Батырбеков Г.А. и др. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований: Препринт НЯЦ РК-00-12. – Курчатов, 2000. – 75 с.
2. Ракитин В.И. Руководство по методам вычислений и приложения Mathcad. – М.: Физмалит, 2005. – 264 с.
3. Михеев М.А. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

Поступила 09.04.2012 г.