

УДК 621.039.5

ВАЛИДАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВОТК-НОУ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Хажидинов А.С., Гановичев Д.А., Акаев А.С., Мартыненко Е.А., Хажидинова А.Р.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Объектом исследования является теплофизическая модель водоохлаждаемого технологического канала с топливом низкого обогащения (ВОТК-НОУ) реактора ИВГ.1М и экспериментальные данные с пусков П17-07, П17-08 и П17-09 реактора ИВГ.1М. Для обоснования применимости разработанной модели в нестационарных расчетах теплофизических процессов реакторной установки ИВГ.1М проведена валидация и верификация теплофизической модели ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М. Разработанная теплофизическая модель ВОТК-НОУ может быть использована для анализа аварийных ситуаций, направленных на обоснование безопасности реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

Ключевые слова: реактор ИВГ.1М, тепловыделяющая сборка, стационарный тепловой расчет реактора ИВГ.1М, валидация теплофизической модели.

ВВЕДЕНИЕ

Реактор ИВГ.1М представляет собой исследовательский водо-водяной гетерогенный корпусной ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководным замедлителем и теплоносителем и бериллиевым отражателем нейтронов. Эксплуатирующей организацией является филиал «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» [1].

В рамках работы по конверсии реактора ИВГ.1М на топливо с низким обогащением необходимо выполнить ряд теплофизических расчетов, имитирующих развитие аварийных ситуаций и направленных на обоснование безопасности реактора ИВГ.1М с ВОТК-НОУ. Данная работа посвящена исследованию адекватности разработанной теплофизической модели ВОТК с топливом низкого обогащения.

При выполнении ответственных инженерных расчетов численными методами для обоснования корректности расчетных моделей необходимо применять процедуру верификации и валидации модели. Верификация проводится в области математики, а валидация – в области физики.

За последнее время в Филиале ИАЭ НЯЦ РК проведен ряд реакторных испытаний (П17-07, П17-08 и П17-09) двух экспериментальных технологических каналов ВОТК-НОУ в натурных условиях. Эти испытания являются составляющей частью работ по обоснованию возможности конверсии реактора ИВГ.1М на низкообогащенное топливо, выполняемых в рамках основного контракта между РГП НЯЦ РК и Аргоннской Национальной Лабораторией (АНЛ) США. Экспериментальные данные с пусков использовались для валидации расчетной трехмерной модели ВОТК, построенной в расчетной программе ANSYS FLUENT.

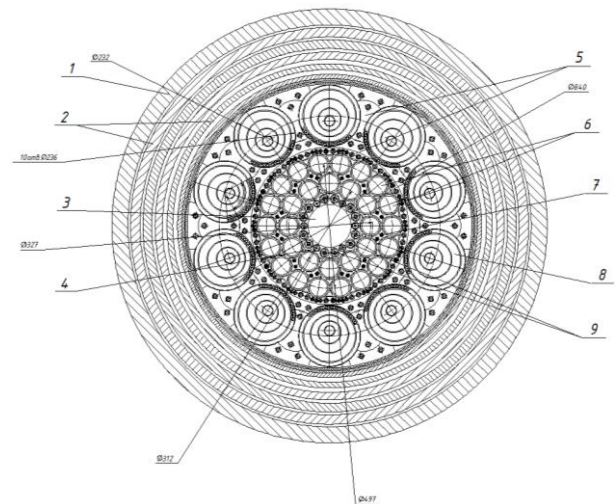
Для верификации результатов расчета, полученных в программе ANSYS FLUENT, использована математическая модель, реализованная посредством расчетной программы MathCAD, которая позволяет

оценить стационарные теплофизические параметры ВОТК-НОУ.

Результаты расчетов, полученных посредством использования рассматриваемой модели, будут включены в отчет «Нормальный режим работы и анализ проектных аварий ИР ИВГ.1М с ВОТК-НОУ».

1. КОНСТРУКЦИЯ РЕАКТОРА ИВГ.1М

Активная зона реактора ИВГ.1М содержит 30 ВОТК-НОУ, в которых ТВЭЛы расположены по треугольной решетке, как показано на рисунках 1 и 2 [1, 2]. В центральной ячейке реактора расположен окруженный бериллиевым вытеснителем петлевой канал, в который возможна установка экспериментального устройства.



1 – корпус; 2 – боковые экраны; 3 – петлевой канал; 4 – центральный вытеснитель; 5 – отражатель; 6 – ВОТК; 7 – источник нейтронов; 8 – регулирующие барабаны; 9 – стержни компенсации реактивности.

Рисунок 1. Схема поперечного разреза реактора ИВГ.1М

Конструктивные, технические и теплофизические параметры ИВГ.1М позволяют решать следующие задачи: исследование последствий развития аварийных ситуаций в ядерных реакторах в экологи-

ческом аспекте; изучение рабочих процессов, связанные с применением различных типов ТВС и теплоносителей для объектов испытаний; а также задачи радиационного материаловедения в рамках комплексных программ по изучению проблем безопасности АЭС.

На рисунке 3 показан профиль энергосвечения по высоте ТВЭЛа ТВС первого ряда [2–4].

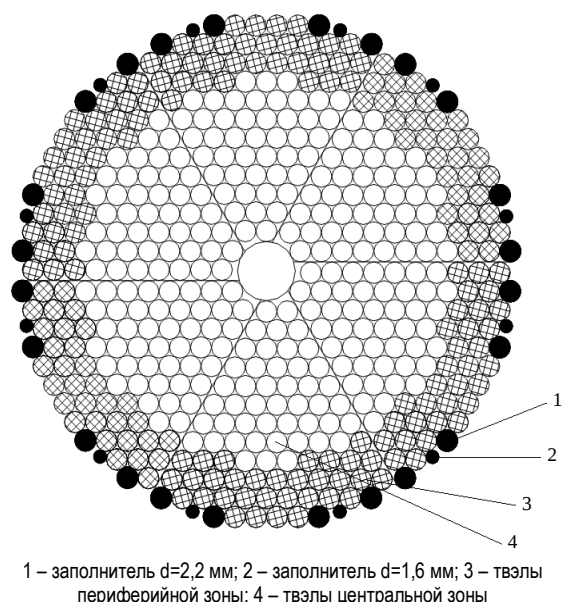


Рисунок 2. Расположение ТВЭЛов в поперечном сечении ТВС, образующих треугольную решетку

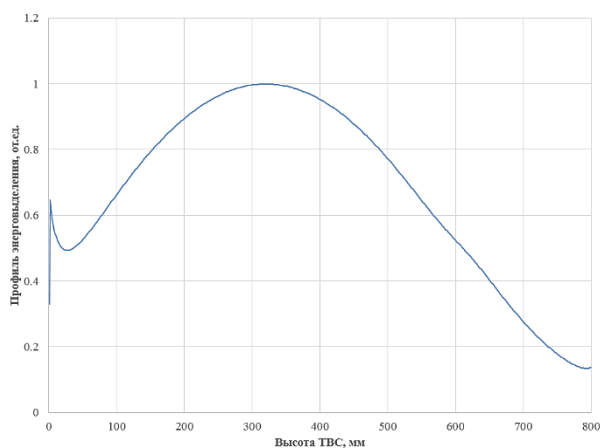


Рисунок 3. Профиль энергосвечения в топливе ТВЭЛа 1 ряда ВОТК при мощности реактора 6 МВт

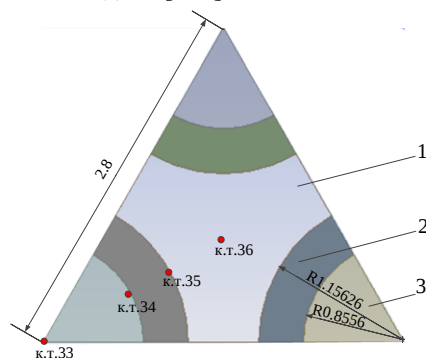
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ С ПУСКОВ П17-07, П17-08 и П17-09 РЕАКТОРА ИВГ.1М

В таблице 1 указаны экспериментальные значения температуры теплоносителя на входе и выходе из ВОТК-НОУ при заданном расходе и мощности канала во время пусков.

Указанные в таблице значения параметров использовались в качестве исходных данных для расчета значений температуры воды на выходе из ТВС ВОТК-НОУ.

3. УСЛОВИЯ РАСЧЕТА И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ВОТК-НОУ в ПРОГРАММЕ ANSYS FLUENT

Теплофизический расчет проведен в программе FLUENT. Расчетная модель имеет форму треугольной призмы. В расчетной модели ТВЭЛы представлены в виде цилиндра, как показано на рисунке 4. Таким образом, расчетная модель имитирует треугольный сектор решетки ТВС (рисунок 2) высотой 0,8 м. На рисунке 5 приведена конечно-элементная сетка расчетной модели [4–6].



1 – теплоноситель (H₂O); 2 – оболочка (Э110); 3 – топливо (сплав U-Zr)

Рисунок 4. Расчетная модель ТВС

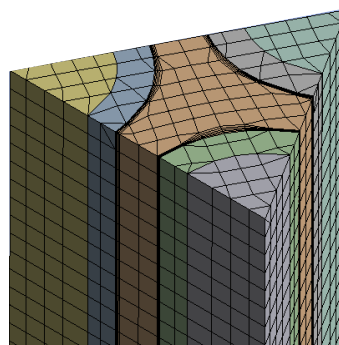


Рисунок 5. Конечно-элементная сетка расчетной модели

Таблица 1. Параметры работы ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М

Параметр	Эксперимент П17-09 (11:12)	Эксперимент П17-08 (10:52)	Эксперимент П17-07 (14:00)
Экспериментальное значение температуры воды на входе в ТВС, °С	45,12	42,01	58,9
Экспериментальное значение температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ, °С	68,7	64,9	80,7
Расход воды через ВОТК-НОУ, кг/с	2,24	2,26	2,28
Мощность одного ВОТК-НОУ, МВт	0,25186	0,252333	0,25021

В расчетной модели учтены следующие процессы: стационарное распределение энергосвечения по высоте ТВЭЛов, теплообмен за счет теплопроводности, конвективный теплообмен, а также зависимость теплофизических свойств материалов от температуры.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОТК-НОУ

Расчет проводится с помощью системы автоматического проектирования и расчета MathCAD 15. Математическая модель создана с помощью системы уравнений, описывающей тепловые процессы в активной зоне [7].

На рисунке 6 показана расчетная схема технологического канала [7].

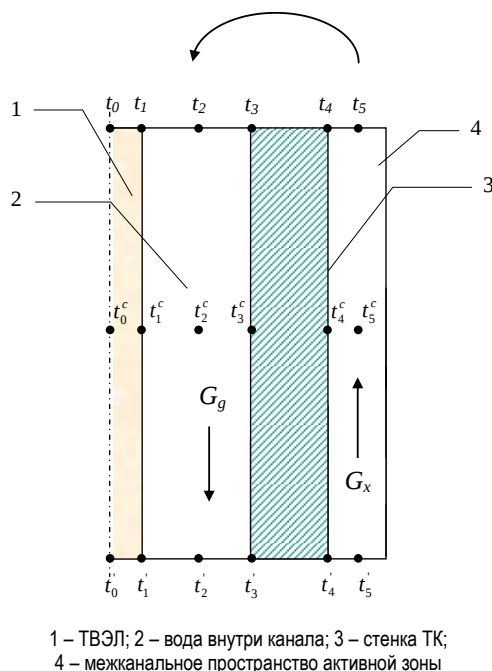


Рисунок 6. Расчетная схема ВОТК-НОУ

На рисунке 6 стрелками показано направление течения воды. Вода, охлаждающая конструкции реактора и внешние поверхности стенок ВОТК-НОУ, 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-НОУ, охлаждает тепловыделяющую сборку и затем, пройдя по всей длине технологического канала вниз, сливается из реактора.

Для учета неравномерности энергосвечения по высоте активной зоны реактора, модель ТВС разбивается по высоте активной зоны на ряд расчетных участков. Предполагается, что в пределах одного расчетного участка энергосвечение неизменно. На рисунке 6 показан один из расчетных участков. Тепловой баланс рассматриваемого расчетного участка описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} Q_{\text{мec}} = G_g \cdot C_p \cdot (t_2' - t_2) + \alpha_g \cdot F_g \cdot (t_2^c - t_3^c) \\ \frac{G_x \cdot C_p}{30} \cdot (t_5' - t_5) = \alpha_x \cdot F_x \cdot (t_4^c - t_5^c) \\ q_0 \cdot V + \alpha_g \cdot F_g \cdot (t_2^c - t_3^c) = \alpha_x \cdot F_x \cdot (t_4^c - t_5^c) \\ t_3^c - t_4^c = \frac{q_0 \cdot r_1^2}{4 \cdot \lambda_c} \left(\left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 2 \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) - 1 \right) \end{cases}$$

где: $Q_{\text{мec}}$ – мощность, выделяемая в пределах расчетного участка ТК, Вт;

C_p – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении, $C_p = 4196 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

α_x – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности корпуса ТК в охлаждающую воду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

α_g – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности корпуса ТК в охлаждающую воду, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

r_2 – наружный радиус корпуса ТК, $r_2 = 0,038 \text{ м}$;

r_1 – внутренний радиус корпуса ТК, $r_1 = 0,035 \text{ м}$;

V – объем стенки ТК расчетного участка, м^3 ;

F_x, F_g – площадь внешней и внутренней поверхностей стенки ТК расчетного участка, м^2 ;

q_0 – энергосвечение в стенке ТК, $\text{Вт}/\text{м}^3$;

λ_c – коэффициент теплопроводности стенки ТК, $\lambda_c = 210 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_2^c – среднее значение температуры воды внутри ТК на расчетном участке, $^\circ\text{C}$;

t_3^c – среднее значение температуры внутренней поверхности стенки ТК, $^\circ\text{C}$;

t_4^c – среднее значение температуры внешней поверхности стенки ТК, $^\circ\text{C}$;

t_5^c – среднее значение температуры воды в межканальном пространстве, $^\circ\text{C}$;

t_2 – температура воды в ТК (в начале расчетного участка), $^\circ\text{C}$;

t_2' – температура воды на выходе из ТК (в конце расчетного участка), $^\circ\text{C}$;

t_5 – температура воды в межканальном пространстве (в начале расчетного участка), $^\circ\text{C}$;

t_5' – температура воды в межканальном пространстве (в конце расчетного участка), $^\circ\text{C}$.

5. ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

При выполнении ответственных инженерных расчетов численными методами для обоснования корректности расчетных моделей рекомендуется применять процедуру верификации и валидации модели, разработанную и предложенную ведущими мировыми организациями в области инженерных расчетов – NAFEMS (International Association for the Engineering Modelling, Analysis and Simulation Community) и ASME (American Society of Mechanical Engineers).

Таблица 2. Расчетные значения теплофизических параметров теплоносителя ВОТК-НОУ для серии экспериментов П17-07, П17-08 и П17-09

Параметр	Эксперимент П17-09 (11:12)	Эксперимент П17-08 (10:52)	Эксперимент П17-07 (14:00)
Расчетное значение температуры воды на выходе из ТВС по программе ANSYS FLUENT, °C	72,2	68,9	85,3
Расчетное значение температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ по программе ANSYS, °C	71,8	68,5	84,8
Расчетное значение температуры воды на выходе из ТВС по программе MathCAD, °C	70,6	67,3	83,9
Экспериментальное значение температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ, °C	68,7	64,9	80,7
Относительное отклонение расчетных значений температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ по программе ANSYS FLUENT от экспериментальных, %	4,5	5,5	5,1
Относительное отклонение расчетных значений температуры воды на выходе из ТВС по программе ANSYS FLUENT от расчетных значений температуры по программе MathCAD, %	2,3	2,4	1,7

Исследователь-расчетчик последовательно создает расчетную схему и два вида моделей – математическую и численную. Математическая модель – математическое представление реального объекта или системы. Численная модель – программный код, реализующий представление объекта или системы в форме, приближенной к алгоритмическому описанию, включающей набор данных, характеризующих свойства системы и динамику их изменения со временем.

Применительно к данным видам моделей для проверки их адекватности используются подход верификации и валидации. Верификация проводится в области математики, а валидация – в области физики.

Для оценки результатов расчета использовались данные с пусков П17-07, П17-08 и П17-09 реактора ИВГ.1М в определенный момент времени.

В таблице 2 приведены расчетные значения теплофизических параметров теплоносителя ВОТК-НОУ для серии экспериментов П17-07, П17-08 и П17-09.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы выполнена верификация расчетной теплофизической модели

ВОТК-НОУ, разработанной посредством программного комплекса ANSYS FLUENT, с математической моделью, описывающей стационарное тепловое состояние ВОТК-НОУ, реализованной в системе автоматического проектирования и расчета MathCAD 15. Определено, что отличие результатов, получаемых с помощью разработанного программного кода (численной модели) отличаются от результатов математической модели не более чем на 2,4 %.

Так же выполнена валидация разработанной теплофизической модели ВОТК-НОУ по результатам пусков П17-09, П17-08 и П17-07. Определено, что относительное отклонение расчетных значений температуры воды на выходе из ВОТК-НОУ от экспериментальных не превышает 5,5 %.

Таким образом, разработанная теплофизическая модель применима для оценки теплофизических параметров ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М, также модель может быть использована для анализа аварийных ситуаций, направленных на обоснование безопасности реактора ИВГ.1М с топливом низкого обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплекс исследовательских реакторов «Байкал-1». Исследовательский реактор ИВГ.1М: Отчет по анализу безопасности: АК.65000.01.966Д / отделение ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 12.11.2013. – Инв. № К-51622.
2. Описание реактора ИВГ.1М: Отчет: / отделение ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 10.11.2010. – № 37-370-01/1729 вн.
3. Характеристика активной зоны реактора ИВГ.1М с низкообогащенным ураном: отчет (Deliverable 2.3 under ANL Contract 0J-30461-0002B) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. рук. А.А. Колодешников, А.Д. Вурим, В.А. Зувев. – Курчатов, 2011. – 31 с.
4. Расчет энерговыделения реактора ИВГ.1М с ВОТК-НОУ № 11-220-02/69вн от 10.01.2017 г / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. авт. Иркимбеков Р.А.
5. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники – М.: АТОМИЗДАТ, 1968. – 484 с.
6. «Расчет теплофизических параметров ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М в стационарном режиме при мощности реактора 10 МВт» № 13-240-02/1413вн от 08 сентября 2017 г. / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК.
7. «Расчет параметров охлаждения ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М» №13-240-02/1538вн от 03 октября 2016 г. / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК.

ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ ССТК- ТБУ ЖЫЛУ ФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛІН БЕКІТУ

А.С. Хажидинов, Д.А.Гановичев, А.С. Акаев, Е.А. Мартыненко, А.Р. Хажидинова

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Зерттеу объекті ретінде ИВГ.1М реакторының төмен байытылған отыны бар сумен салкындатылатын технологиялық каналының (ССТК-ТБУ) жылу физикалық моделі және ИВГ.1М реакторының П17-07, П17-08 және П17-09 іске қосуларынан эксперименттік мәліметтер болып табылады. Өзірленген моделді ИВГ.1М реакторлық қондырғысында жылу физикалық үрдістерінің стандартты емес есептемелерінде қолдануды негіздеу үшін ИВГ.1М реакторының ССТК-ТБУ жылу физикалық моделін бекіту және анықтау жүргізілді. Өзірленген ССТК-ТБУ жылу физикалық моделі төмен байытылған отынды ИВГ.1М реакторының қауіпсіздігін негіздеуге бағытталған апаттық жағдайларды талдау үшін қолданылуы мүмкін.

Негізгі сөздері: *ИВГ.1М реакторы, жылу бөлінгіш жинақ, ИВГ.1М реакторының стационарлық жылу есебі, жылуфизикалық моделді бекіту.*

VALIDATION OF THE THERMOPHYSICAL MODEL OF IVG.1M REACTOR WCTC-LEU

A.S. Khazhidinov, D.A. Ganovichev, A.A. Akaev, Ye.A. Martynenko, A.R. Khazhidinova

Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The object of the study is a thermophysical model of a water-cooled technological channel with low enrichment fuel (WCTC-LEU) of IVG.1M reactor and experimental data from IVG.1M reactor P17-07, P17-08 and P17-09 start-ups. Validation and verification of WCTC-LEU thermophysical model of IVG.1M reactor was conducted to substantiate the applicability of the developed model in non-stationary calculations of thermal processes of the IVG.1M reactor installation. Developed thermophysical model of WCTC-LEU can be used for the analysis of emergency situations aimed at justifying the safety of the IVG.1M reactor with low enrichment fuel.

Key words: *IVG.1M reactor, fuel assembly, stationary thermal calculation of IVG.1M reactor, thermophysical model validation.*