

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-21-25>

УДК 621.039.5

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТВЭЛА ВОТК-НОУ РЕАКТОРА ИВГ.1М ПРИ ОТСЛОЕНИИ ТОПЛИВНОГО СЕРДЕЧНИКА ОТ ОБОЛОЧКИ

С.М. Хасенова^{1,2)}, О.А. Степанова²⁾, А.С. Акаев¹⁾, Е.А. Мартыненко¹⁾, А.С. Сураев¹⁾

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

E-mail для контактов: khasenova@nnc.kz

В настоящей статье представлен анализ теплового состояния твэла ВОТК-НОУ реактора ИВГ.1М, выполненный для случая отслоения топливной матрицы от оболочки твэла по короткой стороне лопасти. Технология изготовления твэлов для модернизированной активной зоны предполагает наличие неоднородностей в микроструктуре. Для оценки влияния отслоений характерного размера на тепловой режим работы твэла проведены расчеты температурных полей в поперечном сечении твэла. Теплофизические расчеты были проведены методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS. В результате проведения вариантных расчетов получены данные о влиянии отслоений на распределение температурного поля твэла во время работы реактора ИВГ.1М при проектной и номинальной мощности.

Ключевые слова: ИР ИВГ.1М, твэл, температурное поле, низкое обогащение, ТВС, теплофизический расчет.

ВВЕДЕНИЕ

ИВГ.1М – исследовательский водо-водяной гетерогенный корпусной ядерный реактор на тепловых нейтронах с легководяными теплоносителем и замедлителем, и бериллиевым отражателем нейтронов [1].

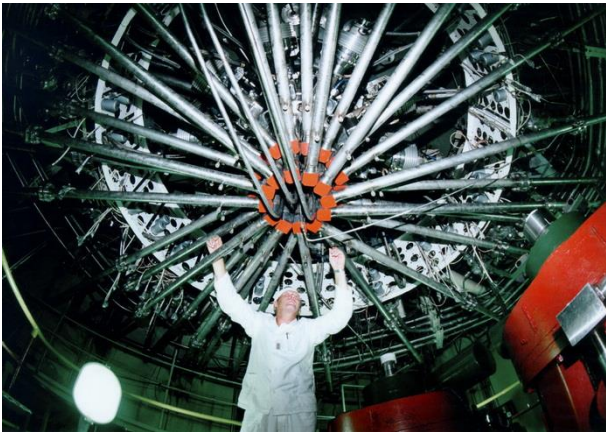


Рисунок 1. Реактор ИВГ.1М

Исследовательский реактор ИВГ.1М является модернизацией реактора ИВГ.1, использовавшегося для испытаний тепловыделяющих сборок (ТВС) и активных зон высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов [2]. Реактор ИВГ.1 был разработан и изготовлен в конце 60-х – начале 70-х годов и введен в эксплуатацию в Казахстане в 1975 г. Возможность замены активной зоны реактора позволила использовать различные типы технологических каналов, отличающиеся по назначению, размерам, загрузке по U-235, максимальной мощности, виду, значениям теплогидравлических параметров – температуры, давления и расхода теплоносителя [3]. В конце 80-х реактор был модернизирован путем замены газоохлаждаемых технологических каналов на водоохлаждаемые технологические каналы (далее ВОТК) и в 1990 г., с об-

новленным названием ИВГ.1М, повторно введен в эксплуатацию. Вид снизу на реактор ИВГ.1М приведен на рисунке 1 [4].

Реактор с ВОТК успешно и безотказно эксплуатировался по настоящее время включительно. Твэлы ВОТК изготавливались из сплава U-Zr с содержанием урана 2–4% масс. при обогащении 90% по изотопу U-235.

В настоящее время в рамках международной программы по снижению обогащения топлива исследовательских реакторов [5] Национальный ядерный центр РК успешно реализует проект по конверсии исследовательского реактора ИВГ.1М. Конверсия реактора необходима для уменьшения оборота высокообогащенного уранового топлива в мире, так как оно может быть использовано для создания ядерного оружия. Главная цель конверсии заключается в замене действующих ТВС с топливом высокого обогащения на ТВС с низкообогащенным топливом (НОУ), содержащим (до 20 % масс.) уран. Для реализации этой задачи было принято решение об изготовлении комплекта ВОТК-НОУ взамен действующих ВОТК.

Сложность конверсии заключалась в необходимости изготовления уникальных твэлов, которые не применимы для других установок. Изготовление таких твэлов в серийном производстве не целесообразно. Перед учеными стояла задача снизить обогащение урана в топливе до допустимого уровня, при этом для сохранения исходных характеристик активной зоны топливо должно было содержать большее количество урана. Для изготовления твэлов ВОТК использовался метод холодной деформации, который оказался не эффективен при повышении количества урана, поэтому при изготовлении новых твэлов была выбрана волоконная технология [6].

Топливо для модернизированной активной зоны основано на композиции, представляющей собой ма-

трицу из циркония с размещенными в ней изолированными друг от друга волокнами металлического урана, расположенными параллельно оси твэла (твэл-НОУ). Технология изготовления твэлов для ВОТК-НОУ основывается на экструзии, волочении и прокатке, что предполагает возможное наличие неоднородностей в макро- и микроструктуре твэла. Металлографический анализ сотен шлифов в процессе изготовления твэлов показывает, что в 10% потока твэла-НОУ встречаются расслоения характерных форм и размеров [7].

В связи с этим, для анализа безопасности реактора ИВГ.1М необходимо провести оценку влияния отслоения топливного сердечника от оболочки на термомеханический режим твэла. Одним из способов оценки влияния отслоения топливного сердечника является метод компьютерного моделирования. Для этого необходимо провести варианты расчеты полей температур в поперечном сечении твэла, что и является целью данной работы.

Таким образом, в настоящей статье, методом компьютерного моделирования рассмотрено влияние частичного неравномерного отслоения топливного сердечника от оболочки на разные толщины при мощности реактора ИВГ.1М равной 60 и 10 МВт. Размеры отслоений были выбраны исходя из площади дефекта, зафиксированного в результате материаловедческих исследований твэлов-НОУ. В результате исследований определены температурные поля поперечного сечения твэла при отслоении сердечника от оболочки твэла по короткой стороне лопасти.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является твэл-НОУ реактора ИВГ.1М.

Твэл-НОУ представляет собой монолитный стержень «сверлообразной» формы с оболочкой толщиной 0,25 мм, металлургически сваренной с топливным сердечником. Материал матрицы и оболочки твэла – сплав Э110.

Поперечное сечение твэла-НОУ приведено на рисунке 2 [7].



Рисунок 2. Поперечное сечение твэла-НОУ

Эскиз твэла с основными размерами приведен на рисунке 3.

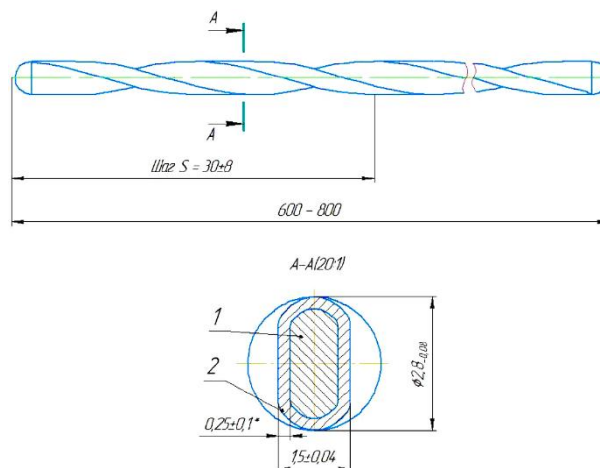


Рисунок 3. Эскиз твэла-НОУ

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетные исследования проведены с применением программного комплекса ANSYS Fluent [8] методом конечных элементов.

В силу симметрии для проведения расчета построена двумерная осесимметричная модель, приведенная на рисунке 4.



Рисунок 4. Расчетная модель

Моделирование теплового состояния твэла рассматривалось при нормальном режиме эксплуатации реактора ИВГ.1М при 60 и 10 МВт мощности. Ширина зазора между топливом и оболочкой принималась равной 30, 20 и 10 мкм. При проведении расчетов зазор принимался заполненным воздухом при атмосферном давлении.

Конечно-элементная сетка модели содержит 39820 узлов и 39214 элементов.

Для проведения расчетов использовано максимальное значение энерговыделения по высоте для ВОТК-НОУ первого ряда.

На внешней поверхности оболочки твэла задано условие конвективного теплообмена, коэффициент теплоотдачи рассчитывался по приведенным ниже формулам.

Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности оболочки ТВЭЛА в воду определяется по формуле [9]

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda_g}{d_g},$$

где d_g – гидравлический диаметр тракта охлаждения, м; λ_g – коэффициент теплопроводности воды при средней температуре, Вт/(м·°C); Nu – число Нуссельта для тракта охлаждения.

Число Нуссельта зависит от режима течения жидкости. Режим течения воды определялся по величине числа Рейнольдса

$$Re = G \cdot \frac{d_g}{S \cdot \mu},$$

где G – расход воды, кг/с; S – площадь проходного сечения охлаждающего тракта, м²; μ – динамический коэффициент вязкости воды при средней температуре, Па·с.

В расчете число Рейнольдса принимает численные значения больше 2000, что означает турбулентный режим течения, при котором число Нуссельта вычисляется по формуле

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43},$$

где Pr – число Прандтля для воды при средней температуре.

Коэффициент теплоотдачи вычислялся по максимальному расходу воды 12,0 кг/с, протекающему через одиночный ВОТК-НОУ при работе реактора ИВГ.1М на проектной мощности 60 МВт и по расходу воды 2,0 кг/с для мощности 10 МВт. Значение коэффициента теплоотдачи для расхода воды 12 и 2 кг/с составило соответственно 56151 и 13392 Вт/(м²·°C).

Для проведения расчета свойства материалов были взяты из справочной литературы [10–12] и заданы в виде функциональной зависимости от температуры.

Температура охлаждающей воды принята равной средней по высоте тепловыделяющей сборки при максимально консервативных условиях 75 °C (из расчета 55 °C на входе в ТВС и 95 °C на выходе).

Программный комплекс производит расчет итеративным методом, критерий сходимости по энергии для полученного решения установлен на уровне $1 \cdot 10^{-7}$ Вт.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для верификации выбранной методики проведения расчетов было проведено моделирование теплового состояния ТВЭЛА без наличия дефектов. На рисунке 5, а приведено расчетное температурное поле для модели при мощности работы реактора 60 МВт при расходе охлаждающей воды 12 кг/с, на рисунке 5, б приведено температурное поле ТВЭЛА при мощности реактора 10 МВт при расходе охлаждающей воды 2 кг/с. Шкала температур на рисунках представлена в градусах Цельсия. Для расчета каж-

дого из приведенных случаев было использовано максимальное значение энерговыделения по высоте ТВЭЛА.

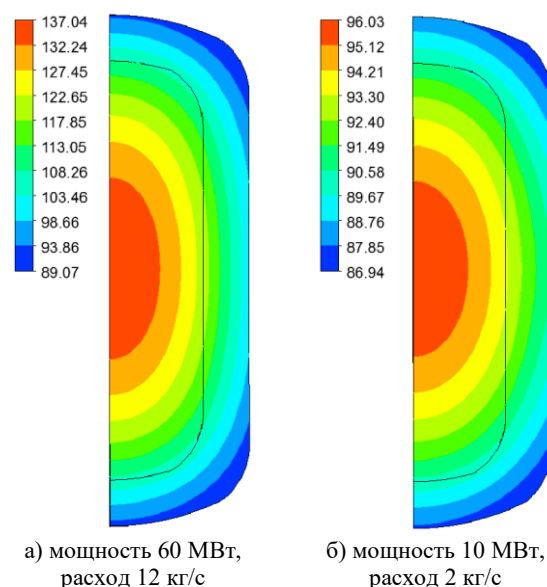


Рисунок 5. Температурное поле модели ТВЭЛА без дефектов при различной мощности реактора и расходе охлаждающей воды

Как видно из рисунков, температурное поле распределено равномерно, максимальные расчетные значения температуры сердечника и оболочки не превышают допустимых пределов эксплуатации, которые составляют 146 и 110 °C соответственно [10].

На рисунках 6 и 7 приведены температурные поля модели при мощности работы реактора 60 и 10 МВт соответственно и различной ширине зазора между сердечником и оболочкой ТВЭЛА.

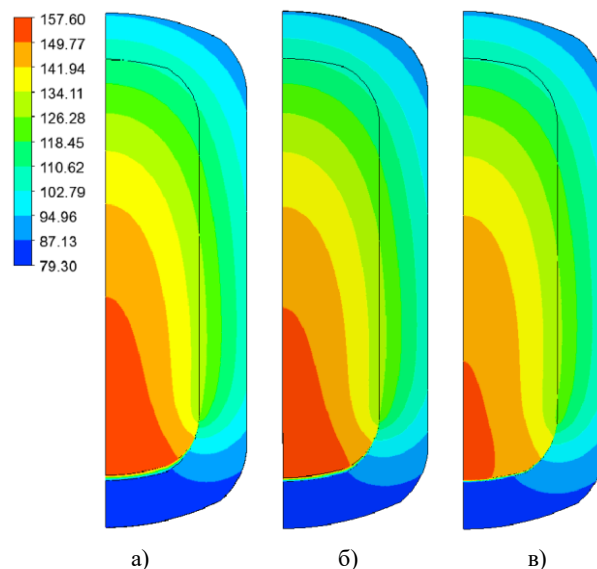


Рисунок 6. Температурные поля модели ТВЭЛА при мощности работы реактора 60 МВт и ширине зазора между сердечником и оболочкой ТВЭЛА 30 мкм (а), 20 мкм (б), 10 мкм (в)

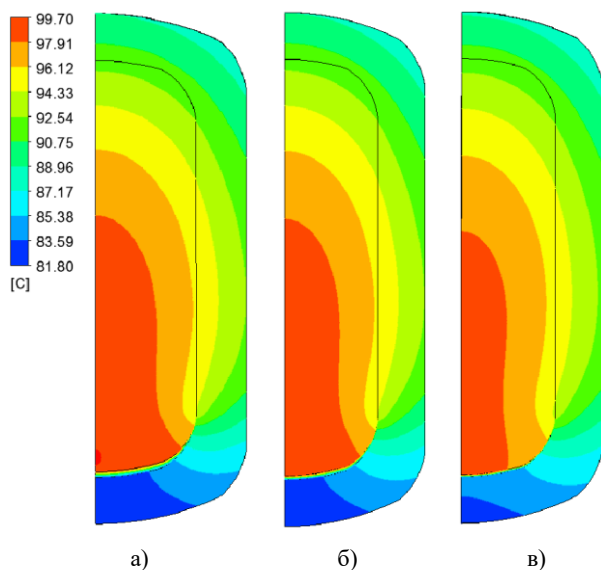


Рисунок 7. Температурное поле модели твэла при мощности работы реактора 10 МВт и ширине зазора между сердечником и оболочкой твэла 30 мкм (а), 20 мкм (б), 10 мкм (в)

Максимальные расчетные значения температурных значений топлива и внешней поверхности твэла-НОУ при наличии отслоений по короткой стороне лопасти при номинальной мощности реактора 60 и 10 МВт представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Расчетные значения максимальной температуры топлива и внешней поверхности оболочки для твэла-НОУ при мощности реактора 60 МВт

Ширина зазора, мкм	Максимальная температура, °С	
	оболочка	сердечник
30	105,8	157,6
20	105,3	156,1
10	104,8	151,6

Таблица 2. Расчетные значения максимальной температуры топлива и внешней поверхности оболочки для твэла-НОУ при мощности реактора 10 МВт

Ширина зазора, мкм	Максимальная температура, °С	
	оболочка	сердечник
30	92,4	99,7
20	92,4	99,5
10	92,1	98,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате расчетных исследований определены температурные поля поперечного сечения твэла при отслоении сердечника от оболочки твэла по короткой стороне лопасти на толщину 30, 20 и 10 мкм.

Результаты расчетов показывают, что газовый зазор между оболочкой и сердечником твэла играет роль теплоизоляции и затрудняет отток тепла конвекцией от внешней поверхности оболочки твэла, поэтому чем больше величина газового зазора, тем выше значения температуры сердечника. При этом, на но-

минальном уровне мощности работы реактора 10 МВт расчетные температурные значения топлива и сердечника не превышают эксплуатационных пределов, а именно 146 °С для топлива и 110 °С для оболочки твэла [10].

При проектной мощности реактора 60 МВт максимальная температура сердечника и внешней поверхности оболочки твэла составят соответственно 157,6 и 105,8 °С. При приведенных температурных значениях обеспечивается целостность оболочки. Кипения в тракте охлаждения не возникнет, поскольку давление в тракте при проведении испытаний поддерживается на уровне ~1 МПа.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что данный вид отслоения топлива твэла-НОУ не может повлиять на безопасность проведения экспериментов при эксплуатации реактора.

Стоит отметить, что расчетная модель является консервативной и не учитывает теплопередачи вдоль твэла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Водоохлаждаемый технологический канал (ВОТК): пояснительная записка к техническому проекту. – НИИ НПО Луч, 1987. – 124 с. – Р837ПЗ. – инв. №1612.
2. Комплекс исследовательских реакторов «Байкал-1». Исследовательский реактор ИВГ.1М: отчет по анализу безопасности. (АК.65000.01.966Д) / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК. – Курчатов, 2013.
3. Прозорова, И.В. Пути модернизации канального исследовательского реактора ИВГ.1М / И.В. Прозорова // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 42–47
4. Реактор ИВГ.1М: официальный сайт РГП НЯЦ РК. <http://www.nnc.kz/facilities/ivg1m.html>
5. Laura Gil. Countries Move Towards Low Enriched Uranium to Fuel Their Research Reactors // IAEA Bulletin. – November, 2019. – Vol. 60-4, pp. 26–27.
6. Ганжур О., «133 урановые нити – НПО «Луч» создало инновационное топливо»: отраслевое издание госкорпорации «Росатом». – 2020. <http://strana-rosatom.ru/2020/01/20/133-uranovye-niti-npo-luch-sozdalo-inn/>
7. Канал водоохлаждаемый технологический с низкообогащенным топливом (ВОТК-НОУ) ВШКЛ.506413.002ПЗ: пояснительная записка к техническому проекту. – ФГУП «НИИ НПО ЛУЧ». – Подольск, 2021.
8. ANSYS release 2021 R2. Documentation for ANSYS WORKBENCH: ANSYS Inc. – 2021.
9. Александров А.А., Теплотехника: учебник для ВУЗов / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров и др. – 5-е изд., М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
10. Канал водоохлаждаемый технологический с низкообогащенным топливом (ВОТК-НОУ) ВШКЛ.506413.002РЭ: руководство по эксплуатации. – ФГУП «НИИ НПО ЛУЧ». – Подольск, 2020.
11. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. – Vienna, 2008.

- 12 Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

REFERENCES

1. Vodoohlazhdaemyy tekhnologicheskij kanal (VOTK): po yasnitel'naya zapiska k tekhnicheskomu projektu. – NII NPO Luch, 1987. – 124 p. – R837PZ. – inv. No. 1612.
2. Kompleks issledovatel'skikh reaktorov "Baykal-1". Issledovatel'skiy reaktor IVG.1M: otchet po analizu bezopasnosti. (AK.65000.01.966D) / DGP IAE RGP NYaTs RK. – Kurchatov, 2013.
3. Prozorova, I.V. Puti modernizatsii kanal'nogo issledovatel'skogo reaktora IVG.1M / I.V. Prozorova // Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. – 2012. – T. 321. – № 2. – pp. 42–47.
4. Reaktor IVG.1M: oficial'nyj sayt RGP NYaC RK. <http://www.nnc.kz/facilities/ivg1m.html>
5. Laura Gil. Countries Move Towards Low Enriched Uranium to Fuel Their Research Reactors // IAEA Bulletin. – November, 2019. – Vol. 60-4, pp. 26–27.
6. Ganzhur O., «133 uranovye niti – NPO «Luch» sozdalo innovacionnoe toplivo»: otraslevoe izdanie goskorporatsii "Rosatom". – 2020. <http://strana-rosatom.ru/2020/01/20/133-uranovye-niti-npo-luch-sozdalo-inn/>
7. Kanal vodoohlazhdaemyj tekhnologicheskij s nizkoobogashchennym toplivom (VOTK-NOU) VShKL.506413.002PZ: po yasnitel'naya zapiska k tekhnicheskomu projektu. – FGUP «NII NPO LUCH». – Podol'sk, 2021
8. ANSYS release 2021 R2. Documentation for ANSYS WORKBENCH: ANSYS Inc. – 2021.
9. Aleksandrov A.A., Teplotekhnika: uchebnyk dlya VUZov / A.A. Aleksandrov, A.M. Arharov, I.A. Arharov i dr. – 5-e izd., Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2017.
10. Kanal vodoohlazhdaemyj tekhnologicheskij s nizkoobogashchennym toplivom (VOTK-NOU) VShKL.506413.002RE: rukovodstvo po ekspluatatsii. – FGUP "NII NPO LUCH". – Podol'sk, 2020.
11. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data / INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. – Vienna, 2008.
12. Rivkin, S.L. Termodinamicheskie svoystva vody i vodyanogo para / S.L. Rivkin, A.A. Aleksandrov. – Moscow: Energoatomizdat, 1984.

ИВГ.1М РЕАКТОРЫНЫҢ ССТК-ТБУ ТВЭЛІНІҢ ОТЫН ӨЗЕГІНІҢ ҚАБЫҚШАДАН ҚАБЫРШАҚТАНА БӨЛІНУІ КЕЗІНДЕГІ ЖЫЛУЛЫҚ КҮЙІН ТАЛДАУ

С.М. Хасенова^{1,2)}, О.А. Степанова²⁾, А.С. Акаев¹⁾, Е.А. Мартыненко¹⁾, А.С. Сураев¹⁾

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ «Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан

Осы мақалада ИВГ.1М реакторының ССТК-ТБУ ТВЭЛІНІҢ ЖЫЛУЛЫҚ КҮЙІНІҢ ТАЛДАУЫ ҰСЫНЫЛҒАН, ҚАЛАҚТЫҢ ҚЫСҚА ЖАҒЫМЕН ТВЭЛ ҚАБЫҚШАСЫНАН ОТЫН МАТРИЦАСЫНЫҢ ҚАБЫРШАҚТАНА БӨЛІНУІ ЖАҒДАЙЫ ҮШІН ОРЫНДАЛҒАН. Жаңғыртылған активті аймақ үшін ТВЭЛдерді дайындау технологиясы микроқұрылымда әртектіліктің болуын болжайды. ТВЭЛДІҢ ЖЫЛУЛЫҚ ЖҰМЫС РЕЖИМІНЕ ТӘН ӨЛШЕМДЕ ҚАБЫРШАҚТАНА БӨЛІНУДІҢ ӘСЕРІН БАҒАЛАУ ҮШІН ТВЭЛДІҢ КӨЛДЕНЕҢ ҚИМАСЫНДАҒЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ӨРІСТЕРДІҢ ЕСЕБІ ЖҮРГІЗІЛДІ. Жылу физикалық есептеулер ANSYS бағдарламалық кешенін пайдалана отырып, соңғы элементтер әдісімен жүргізілді. Нұсқаулық есептеулер жүргізу нәтижесінде ИВГ.1М реакторының жобалық және номиналдық қуатпен жұмыс істеуі барысында ТВЭЛДІҢ температуралық өрісінің таралуына қабыршақтан бөлінудің әсері туралы деректер алынды.

Түйін сөздер: ИВГ.1М ЗР, ТВЭЛ, температуралық өріс, төмен байытылған, ЖШЖ, жылу физикалық есеп.

ANALYSIS OF THERMAL STATE OF A WCTC-LEU FUEL ELEMENT OF THE IVG.1M REACTOR WHEN FUEL KERNEL SEPARATING FROM THE CLADDING

S.M. Khasenova^{1,2)}, O.A. Stepanova²⁾, A.S. Akaev¹⁾, Ye.A. Martynenko¹⁾, A.S. Suraev¹⁾

¹⁾ Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ "Shakarim University of Semey" NP JSC, Semey, Kazakhstan

This article presents an analysis of thermal state of a fuel element of the WCTC-LEU of the IVG.1M reactor implemented for a case when a fuel matrix is separated from the fuel cladding along a short side of the blade. Technology of a fuel element manufacture for the modernized core considers presence of non-uniformity in microstructure. To evaluate how separations of a typical size affects the thermal mode of fuel element operation, temperature fields in cross-sections of the fuel element have been calculated. Thermophysical calculations were conducted using the finite element method with ANSYS program complex. Based on the variants calculation, it was obtained data on the effect of the separation on temperature field distribution of the fuel element during the IVG.1M reactor running at design and nominal power.

Keywords: IVG.1M RR, fuel element, temperature field, low enrichment, FA, thermophysical calculation.