

УДК 621.039.746:621.039.546.8:536.2:519.633:53.08

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТУК-153, ЗАГРУЖЕННОГО ОЯТ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

Курындин А.В., к.т.н. (kuryndin@secnrs.ru), Строганов А.А., к.ф.-м.н. (stroganov@secnrs.ru),
Киркин А.М. (kirkin@secnrs.ru), Карякин М.Ю. (karyakin@secnrs.ru) (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

В работе приведены результаты расчетного исследования температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного ОЯТ реакторов ВВЭР-1000, а также результаты расчетно-экспериментальных исследований, проведенных с целью верификации методов и подходов, использованных при создании расчетных моделей.

► **Ключевые слова:** транспортный упаковочный комплект, температурные режимы, ВВЭР-1000, эксперимент, ТУК-153, имитатор ОТВС.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF TEMPERATURE CONDITION OF CASK TUK 153 LOADED WITH VVER-1000 SNF

Kuryndin A., Ph. D., Stroganov A., Ph. D.,
Kirkin A., Karyakin M. (SEC NRS)

This paper presents the results of computational study of temperature condition of cask TUK-153 loaded with VVER-1000 SNF and results of computational and experimental study performed to justify methods and approaches used in computational models.

► **Key words:** spent fuel cask, spent nuclear fuel, temperature condition, VVER-1000, experiment, TUK-153, SFA imitator.

Рассматриваемый в настоящей работе транспортный упаковочный комплект (ТУК) ТУК-153 (рис. 1) предназначен для транспортирования отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторов ВВЭР-1000 и относится к контейнерам нового поколения. Поскольку все ТУК нового поколения [1] рассчитаны на большие значения остаточного тепловыделения ОЯТ, учитываемые при обосновании безопасности значения температуры оболочек твэлов отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и поверхности ТУК, как правило, близки к их предельно допустимым значениям.

ТУК-153 в соответствии с НП-053-04 [2] относится к упаковкам типа В(U)F. Для таких упаковок

осуществлялось в два этапа.

На первом этапе разработаны и методами математического моделирования обоснованы расчетные модели имитатора ОТВС, а также проведена верификация этих расчетных моделей по результатам расчетно-экспериментального исследования температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного 18 имитаторами ОТВС. Для имитатора ОТВС предварительно проводилось исследование его работоспособности. Все расчетные исследования выполнены с использованием аттестованного программного средства (ПС).

Используемый в ходе экспериментальных исследований имитатор ОТВС представлял собой пучок металлических прутков и трубчатых электро-



Рис. 1. Общий вид ТУК-153

в части температурных режимов устанавливаются требования [2, 3] по:

- максимальной температуре поверхности упаковки (85 °С);
- рабочему диапазону температур окружающей среды (от – 40 до + 38 °С с учетом параметров инсоляции);
- максимальной температуре поверхности упаковки в случае перевозки в закрытом транспортном средстве;
- максимальной температуре поверхности оболочки твэлов перевозимых ОТВС при нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) и в случае пожара;
- максимальной температуре поверхности канала чехла при НУЭ;
- максимальной температуре уплотнения наружной крышки при НУЭ (130 °С).

Выполненное в рамках настоящей работы расчетно-экспериментальное исследование температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного ОЯТ реакторов ВВЭР-1000,

нагревателей (ТЭН), расположенных в треугольной решетке. Габаритные размеры имитатора ОТВС и рабочая длина ТЭН идентичны габаритным размерам ОТВС и активной части твэлов, соответственно. Суммарная мощность 6 ТЭН, расположенных в имитаторе, приблизительно равна остаточному тепловыделению ОТВС и составляет 1,61 кВт. Схема имитатора ОТВС представлена на рис. 2.

Первая экспериментальная установка представляла из себя помещенный в канал чехла (КЧ) имитатор ОТВС с размещенными внутри него термодарами. Экспериментальная установка размещалась на теплоизолированных опорах в горизонтальном положении в камере термостатирования, в которой поддерживалась заданная температура (рис. 3).

Для измерения температур конструктивных элементов имитатора ОТВС использовались термодары, закрепленные на поверхности ТЭН (ТЭП1) и заделанные в соседние с ТЭН прутки (ТЭП2-ТЭП5) на высоте, соответствующей сечению ОТВС с максимальным энерговыделением (рис. 4).

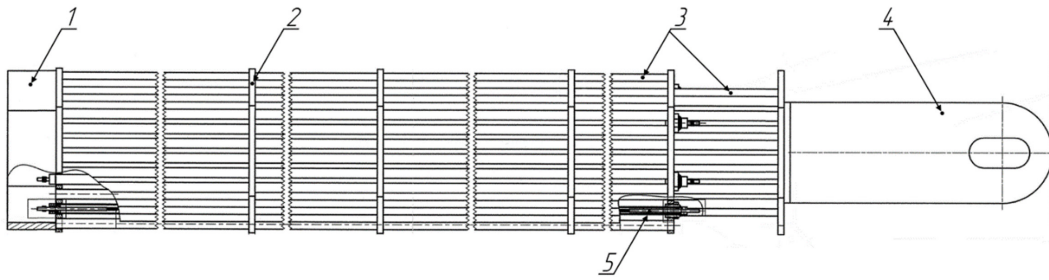


Рис. 2. Схема имитатора ТВС-2М: 1 – стакан; 2 – дистанционирующий диск; 3 – пруток; 4 – хвостовик; 5 – ТЭН



Рис. 3. Экспериментальная установка для подтверждения работоспособности имитатора ОТВС ВВЭР-1000

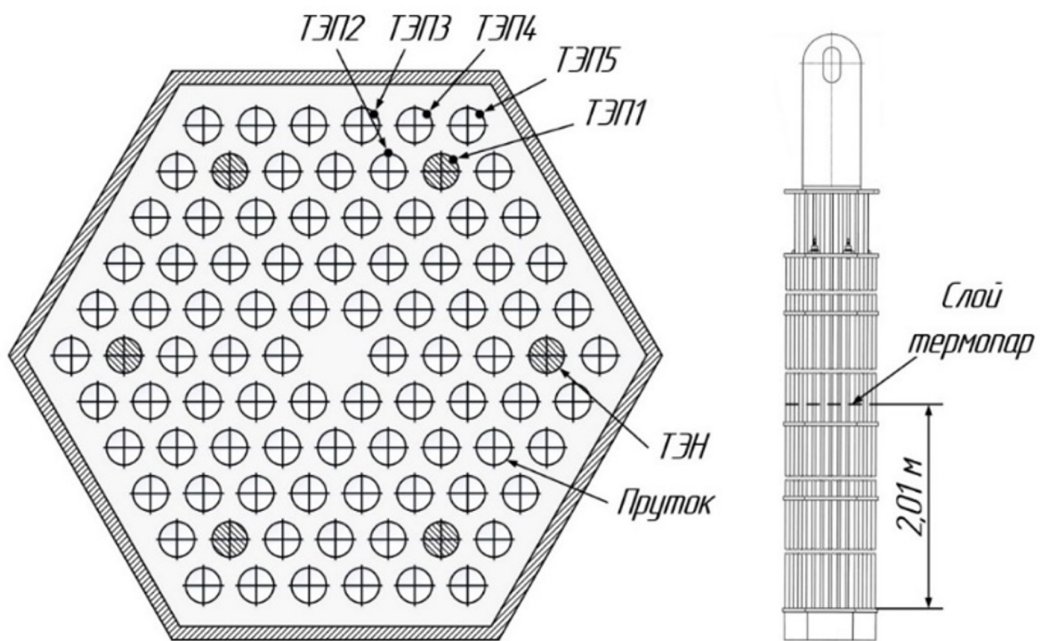


Рис. 4. Схема размещения термопар в имитаторе ОТВС

Показания термопар в ходе выполнения эксперимента фиксировались регистратором многоканальным в непрерывном режиме. Показания наружных поверхностей КЧ фиксировались тепловизором FLIR i3 [4].

В ходе выполнения эксперимента при постоянной температуре в камере термостатирования, равной 20 °С, и работе имитатора на номинальной мощности достигался квазистационарный режим, при котором изменение регистрируемой температуры за последние 2 часа не превышало 1 °С. Затем температура в камере поднималась до 200 °С, а после установления квазистационарного режима производилось отключение установки.

При визуальном осмотре имитатора, проведенном по окончании эксперимента, каких-либо повреждений выявлено не было. Вследствие этого заключено, что такая конструкция имитатора явля-

ется надежной для проведения исследования температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного имитаторами ОТВС.

Расчетная модель имитатора ОТВС (рис. 5) [5] представляет собой двухмерный профиль наиболее энергонапряженного сечения имитатора ОТВС, размещенного в КЧ.

Полученные зависимости показаний термопар и расчетных значений температуры от времени приведены на рис. 6. Сравнение экспериментальных данных и расчетных значений температур конструктивных элементов имитатора ОТВС свидетельствует о том, что превышение расчетных значений над экспериментальными при установившемся квазистационарном режиме составляет порядка 6 %, что подтверждает консервативность приближений, принятых при подготовке расчетной модели.

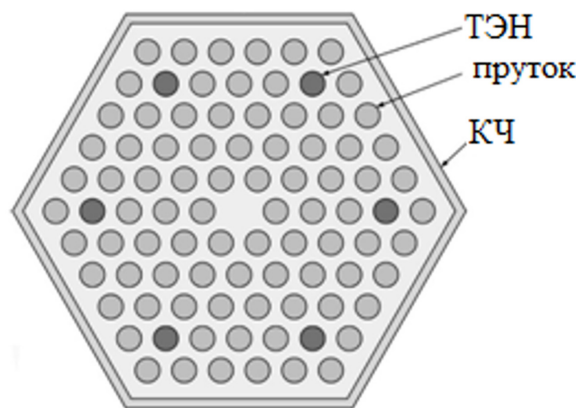


Рис. 5. Расчетная модель имитатора ОТВС

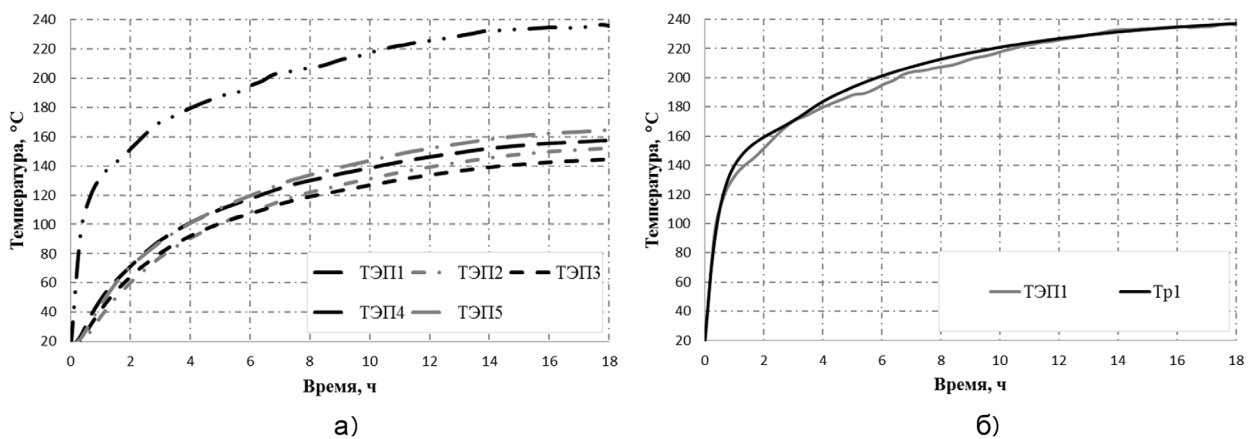


Рис. 6. Результаты расчетно-экспериментального исследования зависимости температурных режимов конструктивных элементов имитатора ОТВС от времени: а) – показания термопар; б) – сравнение экспериментального и расчетного значения температуры поверхности ТЭН

На второй экспериментальной установке осуществлялось исследование температуры внешней поверхности ТУК-153, поверхности КЧ, поверхности ТЭН и поверхности герметизирующей прокладки внутренней крышки. Принципиальная схема экспериментальной установки для определения температурных режимов ТУК-153, нагруженного 18 имитаторами ОТВС, приведена на рис. 7.

Картограмма загрузки ТУК-153 имитаторами ОТВС, а также схема расположения термодпар в имитаторах приведены на рис. 8. Расположение термодпар выбрано исходя из соображений симме-

трии и из предварительной оценки поля температур внутри ТУК-153.

Основой экспериментальной установки является ТУК-153, нагруженный 18 имитаторами ОТВС с подключенным измерительным оборудованием. Упаковка устанавливалась в вертикальном положении на теплоизолирующей опоре в шахте. Контактные кабели и холодные спаи термодпар выводились через отверстие клапана нижней крышки упаковки и слой теплоизолирующего материала. Теплоизоляция использовалась вместо транспортно-рочных демпферов, при этом верхняя крышка в рамках эксперимента не использовалась.

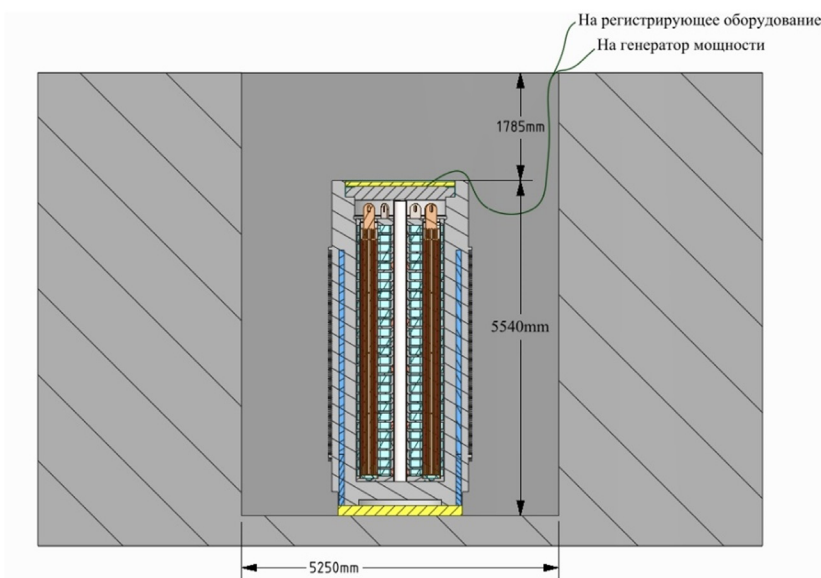


Рис. 7. Схема размещения ТУК-153 в шахте

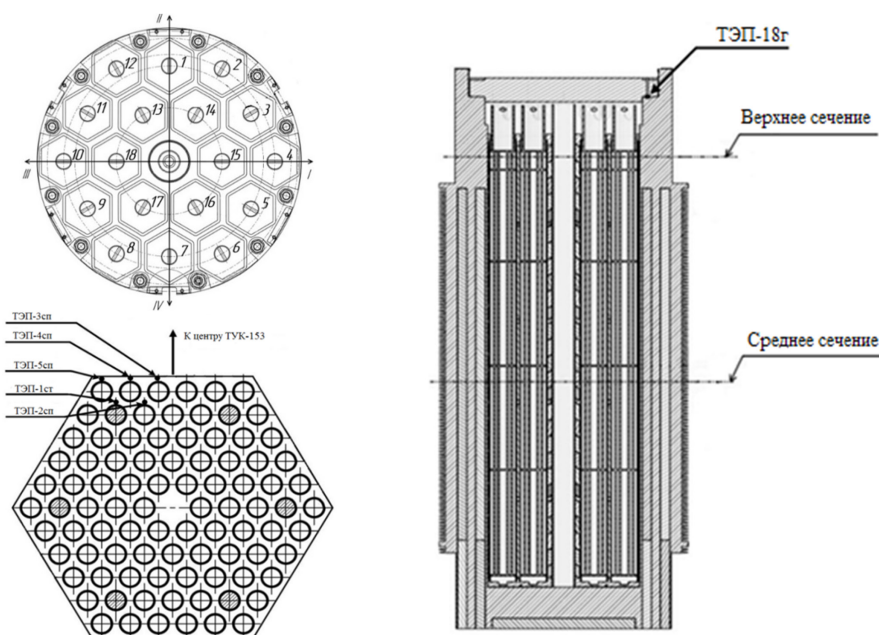


Рис. 8. Картограмма загрузки ТУК-153 и схема размещения термодпар в имитаторах ОТВС

В эксперименте использовался трехфазный источник питания мощностью 30 кВт и многоканальный регистратор сигналов термодатчиков. Температура боковой поверхности упаковки регистрировалась тепловизором. Показания непрерывно регистрирующего оборудования записывались каждые 8 часов. В ходе эксперимента для подтверждения работоспособности силовых кабелей периодически осуществлялись визуальные проверки показаний мощности источника по каждой фазе.

Перед отключением экспериментальной установки производилось контрольное измерение поверхности ТУК-153 контактным термометром. Критерием завершения эксперимента считалось установление квазистационарного режима.

Во время эксперимента по определению температурных режимов ТУК-153 составлены протокол изменений профиля температуры на поверхности ТУК-153, а также протокол измерений значений температур конструктивных элементов ТУК-153 и имитаторов ОТВС. На их основе получены зависимости изменения температуры от времени, представленные на рис. 9.

рованным слоем с эквивалентными теплофизическими свойствами;

- теплообмен между наружной поверхностью корпуса ТУК-153 и окружающей средой осуществляется за счет конвекции и излучения;
- наружная поверхность корпуса ТУК-153 в районе расположения демпферов – адиабатная.

Осесимметричная расчетная модель ТУК-153, загруженного 18 имитаторами ОТВС, и вспомогательные расчетные модели приведены на рис. 10.

Полученные в ходе проведения расчета градиенты температур осесимметричной модели приведены на рис. 11. Результаты расчетных и экспериментальных исследований приведены в табл. 1.

В результате выполнения расчетно-экспериментального исследования температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного имитаторами ОТВС, верифицированы разработанные расчетные модели. Результаты исследования показали, что превышение расчетных значений температур конструктивных

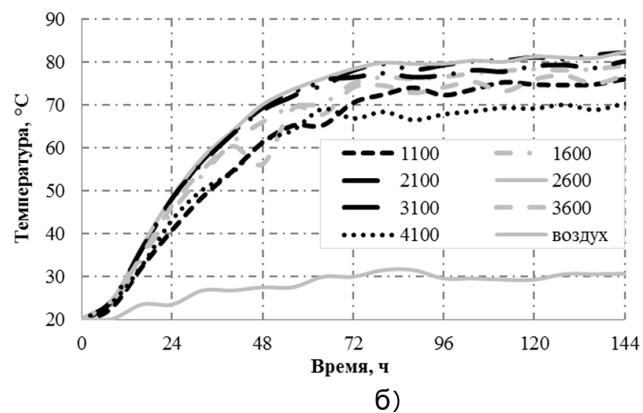
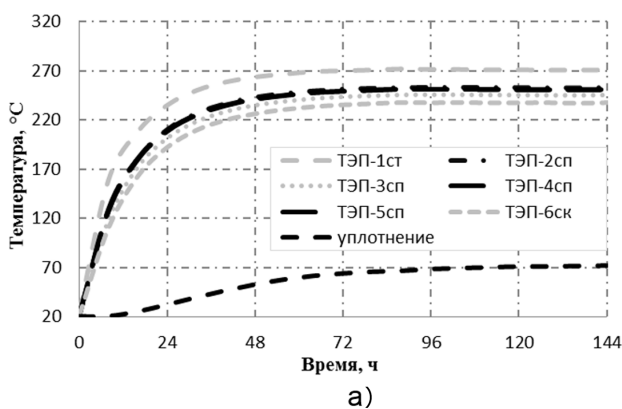


Рис. 9. Зависимости изменения температуры конструктивных элементов ТУК-153, загруженного имитаторами ОТВС, от времени: а) – температура элементов внутреннего имитатора ОТВС, поверхности КЧ и уплотнения внутренней крышки; б) – температуры поверхности корпуса ТУК 153 на разной высоте от основания корпуса (от 1100 до 4100 мм) и температура воздуха

При создании расчетных моделей с использованием аттестованного ПО для решения поставленных в рамках настоящей работы задач использовались следующие приближения и допущения:

- зазор между секциями чехла и внутренней стенкой корпуса упаковки вследствие температурного расширения конструктивных элементов равен 2 мм (в холодном состоянии 4 мм);
- слой нейтронной защиты в корпусе ТУК-153 и часть корпуса заменены гомогенизи-

элементов ТУК-153 над экспериментально измеренными может достигать 10 град., что подтверждает консерватизм использованных расчетных моделей, методов и подходов.

На втором этапе данной работы с использованием верифицированных расчетных моделей проведено расчетное исследование температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного ОЯТ реактора ВВЭР-1000.

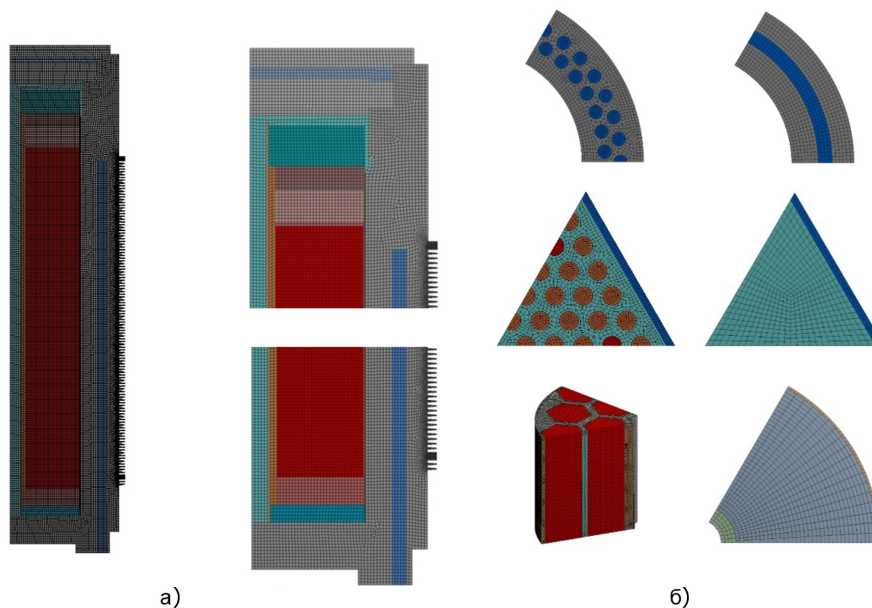


Рис. 10. Осесимметричная а) и вспомогательные б) расчетные модели

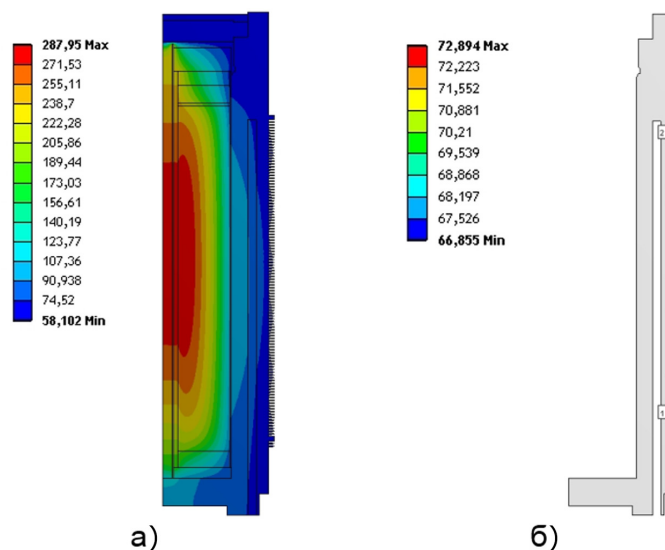


Рис. 11. Температурное поле осесимметричной модели без учета инсоляции:
а) – все элементы модели; б) – на боковой поверхности

Таблица 1

Основные результаты расчетно-экспериментального исследования температурных режимов конструктивных элементов ТУК-153, загруженного имитаторами ОТВС

Исследуемая область	Экспериментальное значение, °С	Расчетное значение, °С	$T_p - T_{\text{э}}$, град.
Боковая поверхность на высоте 2600 мм от основания упаковки	72	73	1
Внутренняя поверхность КЧ	239	244	5
Поверхность ТЭН во внутреннем имитаторе	272	282	10
Уплотнение нижней крышки	72	74	2

Для определения температурных режимов транспортирования ОЯТ разработана расчетная модель ТУК-153, размещенного в горизонтальном положении при температуре окружающей среды 38 °С, находящегося под воздействием солнечных лучей (инсоляции) в течение 12 часов в сутки, и вспомогательные модели (рис. 12). Расчетная модель образована на основе осесимметричной модели (рис. 10) вращением вокруг оси симметрии и поворотом этой оси из вертикального положения в горизонтальное. Это привело к изменению условий теплообмена боковой поверхности ТУК-153 с окружающей средой.

Параметры инсоляции цилиндрической поверхности расчетной модели приняты в соответствии с требованиями НП-053-04 [2] и рекомендациями МАГАТЭ № SSG-26 [6] и приведены на рис. 13. С

учетом изменения загрузки ТУК-153 при гомогенизации ТВС необходимо вместо вспомогательной модели имитатора ОТВС использовать вспомогательную модель ОТВС (рис. 12). Суммарная мощность ОЯТ в соответствии с ограничением, установленным по суммарному остаточному тепловыделению ОЯТ, загруженного в ТУК-153, принята равной 29 кВт.

Динамика изменения температуры поверхности и температурное поле расчетной модели с учетом инсоляции приведены на рис. 14.

Зависимость температур конструктивных элементов ТУК-153 в случае аварии с пожаром приведена на рис. 15. Результаты расчетов температурных режимов ТУК-153, загруженного ОЯТ, и нормативные значения максимально допустимой температуры приведены в табл. 2.

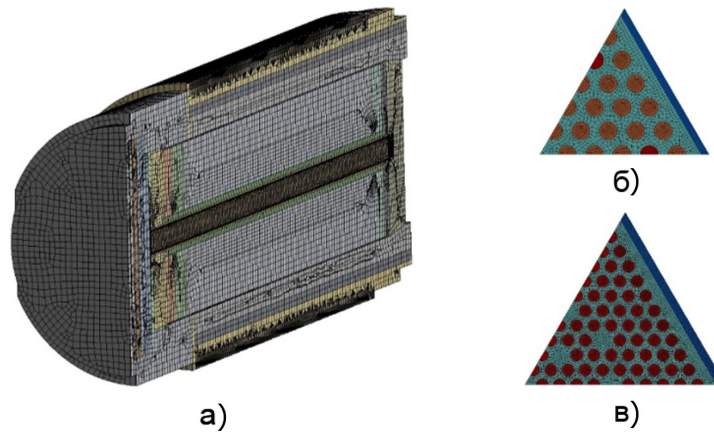


Рис. 12. Расчетная и вспомогательная модели: а) – расчетная модель ТУК-153; б) – вспомогательная модель имитатора ОТВС; в) – вспомогательная модель ОТВС

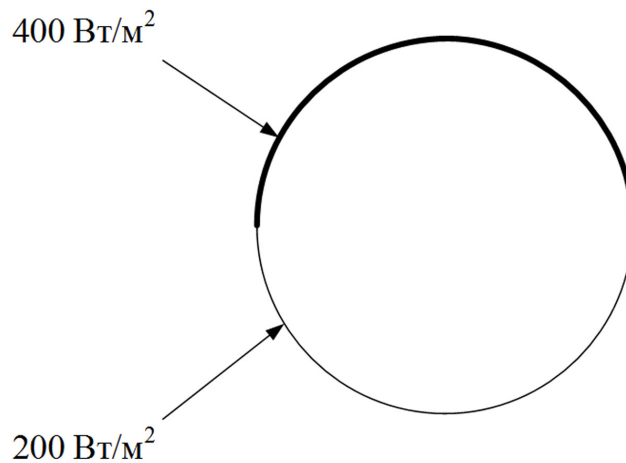


Рис. 13. Параметры инсоляции ТУК-153

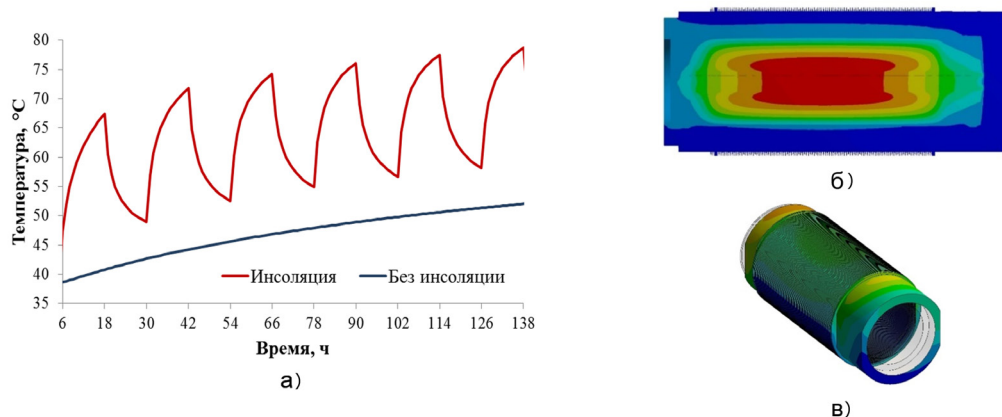


Рис. 14. Результаты расчетного исследования температурных режимов ТУК-153, загруженного ОЯТ, при НУЭ:

- а) – влияние инсоляции на температуру поверхности;
- б) – температурное поле в осевом сечении расчетной модели;
- в) – температурное поле поверхности расчетной модели

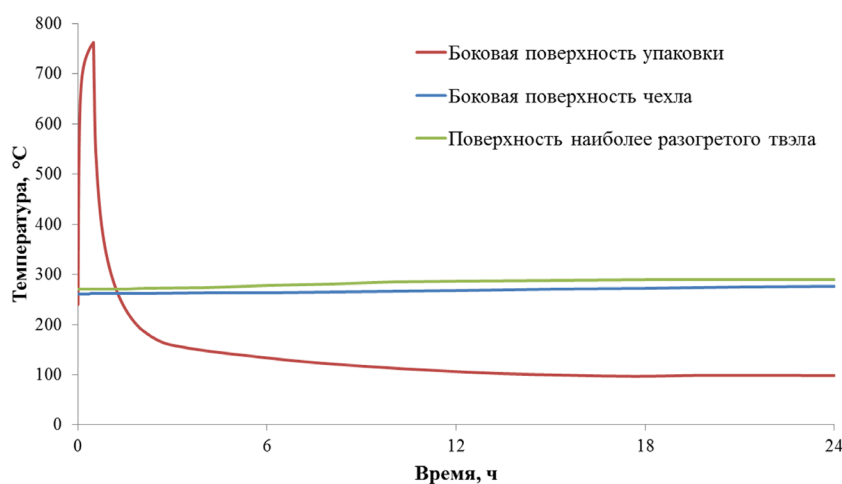


Рис. 15. Зависимость температур конструктивных элементов ТУК-153 в случае пожара

Таблица 2

Результаты расчетного исследования температур конструктивных элементов ТУК-153, загруженного ОЯТ

Исследуемая область	Расчетное значение, °С		Регламентируемое значение
	без учета инсоляции	с учетом инсоляции	
Боковая поверхность	49	71	85
КЧ	184	197	300
Уплотнение внутренней крышки	53	77	110
Поверхность оболочки твэлов	261	271 (288*)	350 (380*)

* В случае пожара.

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что, несмотря на консервативность используемых методов и подходов, значения температуры поверхности ТУК-153, твэлов и герметичного уплотнения внешней крышки, полученные в ходе выполненного на основе верифицированных моделей расчетного исследования температурных режимов ТУК-153, загруженного ОЯТ реактора ВВЭР-1000, не превышают значений, нормируемых в НП-053-04 [2], рекомендациях МАГАТЭ SSR-6 [7] и SSG-26 [6], даже при аварийных условиях транспортирования.

Проведение независимых оценок параметров безопасности является необходимой и неотъемлемой частью экспертизы безопасности (экспертизы обоснования безопасности) объектов использования атомной энергии. Выполнение таких независимых оценок повышает качество выполняемых экспертиз и в конечном счете повышает безопас-

ность самих объектов использования атомной энергии.

Достоверность независимых расчетных оценок параметров безопасности объектов использования атомной энергии, осуществляемых организациями научно-технической поддержки Ростехнадзора, должны подтверждаться расчетными и/или экспериментальными исследованиями параметров безопасности.

Результаты исследований, приведенные в данной работе, а также опубликованные в работах [8, 9, 10], подтверждают консерватизм принятых методов и приближений при создании расчетных моделей с использованием аттестованного ПС. Таким образом, применение в дальнейшем аналогичных методов и подходов к созданию расчетных моделей обеспечит достоверность и консервативность получаемых с их использованием результатов.

Список литературы

1. Программа создания инфраструктуры и обращения с ОЯТ на 2011 – 2020 годы и на период до 2030 года.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. НП-053-04: утверждены Постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 октября 2004 г. № 5. Введены в действие с 5 января 2005 г.
3. Изделия резинотехнические для радиационно-защитных транспортных упаковочных комплектов. ТУ 2531-020-00152081-99.
4. Manual: FLIR IX series (2012 industrial design; A4 page size). FLIR Systems. T559733; г. AA/30822/30822; EN-US, 2015.
5. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М., Энергоатомиздат, 1990.
6. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition). Specific Safety Guide. Vienna: IAEA. ISBN 978-92-0-136910-9 ISSN 1020-525X. – No. SSG-26.
7. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition). Specific Safety Guide. Vienna: IAEA. ISBN 978-92-0-133310-0 ISSN 1020-525X. – No. SSR-6.
8. Киркин А.М., Курындин А.В., Карякин М.Ю., Строганов А.А. Расчетно-экспериментальное исследование температурных режимов имитатора ОТВС ВВЭР-1000. В кн.: Тенденции и перспективы развития современного научного знания: материалы XVI Международной научно-практической конференции, г. Москва, 8 – 9 октября 2015 г. – М., Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований», Изд-во «Перо», ISBN 978-5-00086-641-2, 2015.
9. Карякин М.Ю., Киркин А.М., Курындин А.В., Строганов А.А. Расчетно-экспериментальное исследование тепловых режимов транспортирования ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 в ТУК-153. В кн.: Теплофизика реакторов нового поколения: сборник тезисов докладов на научно-технической конференции (Теплофизика-2015), 06 – 09 октября 2015 г. – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2015.
10. Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Stroganov A.A., Lyashko I.A., Esareva Y.V., Karyakin M.Y. Verification of computational models used in SEC NRS for independent evaluation of safety parameters during SNF transport. – Moscow: SECNRS. / EUROSAFE Towards Convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe. Brussels, 2 – 3 November 2015.

References

1. Programme for the Development of the Infrastructure for Spent Nuclear Fuel Management for the Period 2011 – 2020 and further till 2030.
2. Federal Codes and Regulations in the Field of Atomic Energy Use. Safety Regulations for Transport of Radioactive Material. NP-053-04: approved by Ordinance of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia No. 5 of October 04, 2004. Implemented as of January 5, 2005.
3. Rubber Goods for Radio-Protective Transport and Packaging Containers. Technical Requirements TU 2531-020-00152081-99.
4. Manual: FLIR IX series (2012 industrial design; A4 page size). FLIR Systems. T559733; r. AA/30822/30822; EN-US, 2015.
5. Kutateladze S.S. Heat Transfer and Hydrodynamic Resistance: Handbook. – Moscow, Energoatomizdat. 1990.
6. Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition). Specific Safety Guide. Vienna: IAEA. ISBN 978–92–0–136910–9 ISSN 1020–525X. – No. SSG-26.
7. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material (2012 Edition). Specific Safety Guide. Vienna: IAEA. ISBN 978–92–0–133310–0 ISSN 1020–525X. – No. SSR-6.
8. Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Karyakin M.Yu., Stroganov A.A. Calculation and experimental studies of temperature conditions of a dummy spent fuel assembly VVER-1000. Lib.: Trends and Perspectives of Development of the State-of-the-Art Scientific Knowledge: Materials of the XVI International Research-to-Practice Conference, Moscow, October 8 – 9, 2015. – Moscow, Scientific-Information and Publishing Center “The Institute of Strategic Studies”, “Pero” Publishing Office, ISBN 978–5–00086–641–2, 2015.
9. Karyakin M.Yu., Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Stroganov A.A. Calculation and experimental studies of temperature conditions for VVER-1000 SNF transportation in the transport and packaging containers TUK-153. Lib.: Thermal Physics of New Generation Reactors: Book of abstracts from the Scientific-Technical Conference (Thermal Physics-2015), October 06 – 09, 2015. – Obninsk, JSC “SSC RF-IPPE”, 2015.
10. Kirkin A.M., Kuryndin A.V., Stroganov A.A., Lyashko I.A., Esareva Y.V., Karyakin M.Y. Verification of computational models used in SEC NRS for independent evaluation of safety parameters during SNF transport. – Moscow: SECNRS. / EUROSAFE Towards Convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe. Brussels, 2 – 3 November 2015.

