

РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОФАКТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МНОГОСЛОЙНОМ УСТРОЙСТВЕ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ТВЭЛАМИ

А.В. Саенко, А.В. Тихоненко

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



В работе реализуются математические модели стационарной теплопроводности в многослойном сферически-симметричном устройстве с твэлами, которые учитывают различные физические и технологические факторы. С помощью разработанных комплексов компьютерных программ решаются краевые задачи по определению тепловых полей и формулируются рекомендации по составу твэлов.

Ключевые слова: стационарная теплопроводность, математическая модель, ядерные технологии, комплекс программ.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной проблемой, связанной с развитием ядерных технологий, является проблема нераспространения делящихся материалов, содержащихся в твэлах различных типов устройств [1–4]. В этой связи кроме организационно-охранных развиваются высокотехнологичные способы защиты таких материалов, в том числе подходы, основанные на изменении состава твэлов (этот подход сформулирован в [2, 8]).

Наиболее полные с технической точки зрения модели многослойных устройств со сферическими твэлами рассматривались в работах [2, 5–9]. В частности было показано [2], что при определенном составе твэла будет происходить плавление химически сложного вещества в одной из оболочек устройства, что, в свою очередь, может являться условием его безопасности. Затем эти данные были уточнены для более сложных моделей и для разных технологий устройств [8], а анализ тепловых распределений, учитывающий ряд особенностей теплопроводности в многослойном устройстве со сферическим твэлом, был выполнен в работах [9–11].

В работе строятся математические модели теплопроводности в многослойном сферически-симметричном устройстве с тепловыделяющим слоем, которые учитывают различные физические и технологические факторы; решаются соответствующие краевые задачи для различных граничных условий с помощью комплексов программ в MAPLE и MATHEMATICA.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАССМАТРИВАЕМЫЕ МОДЕЛИ

Температурные распределения в многослойных устройствах со сферическими твэлами зависят от состава тепловыделяющего элемента и тепловых условий на внешней границе устройства. Устройство представляет собой сферически-симметричное образование (рис. 1), состоящее из тепловыделяющего шара I и четырех окружающих его оболочек II–V. В частности, в устройстве подобной конфигурации [2, 8] слои I, II, III и V – металлы с высоким коэффициентом теплопроводности, IV – особые химические соединения с низкой теплопроводностью.

Различают три класса (High, Medium и Low) технологий устройства, которые отличаются геометрическими параметрами, изотопным составом и мощностью твэла (рис. 1).

В работе рассматривается ряд моделей, учитывающих различные факторы. При этом анализ базовой модели (БМ), предложенной в [2], показал [9–11] необходимость использования нелинейной модели (ОНМ) теплопроводности в обширном IV слое, имеющем наибольшую толщину и испытывающем наибольший перепад температур.

Для решения задачи о температурном поле (включая аналитические вычисления, численные расчеты и визуализацию результатов) был создан комплекс программ (в MAPLE и MATHEMATICA). Концепция создания комплексов проблемно-ориентированных программ на основе аналитико-численных алгоритмов в системах символьной математики заключается в алгоритмизации математически поставленных задач средствами встроенных математических ресурсов систем в сочетании со специфическим для них программным заданием физических и математических данных и дополнительных условий; использовании метода функционального программирования на входном языке систем; использовании численных и аналитических методов исследования моделей; сочетании аналитических вычислений и технологии вычислительного эксперимента. Комплекс состоит из совокупности программ, реализующих рассматриваемые модели для различных граничных условий и других факторов:

- БМ – базовая модель (модель линейной теплопроводности);
- МКС (модель, учитывающая наличие контактного термического сопротивления между оболочками);
- ОНМ – ограниченная нелинейная модель (модель, учитывающая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в IV оболочке);

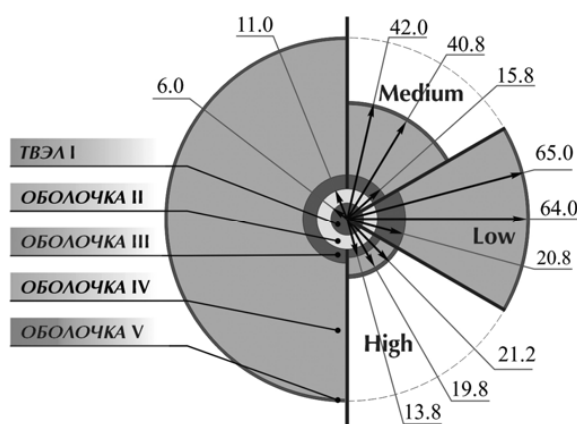


Рис. 1. Схема устройства и геометрические характеристики устройства для трех классов технологий (радиусы оболочек указаны в сантиметрах)

- ПНМ – полная нелинейная модель (модель, учитывающая зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры во всех оболочках);
- ПНК (модель, учитывающая зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры во всех оболочках и наличие контактного термического сопротивления);
- МИГ (модель, учитывающая условия излучения на внешней границе устройства);
- МИТ (модель, учитывающая условия излучения в прослойке между твэлом и отражателем);
- МВВ (модель, учитывающая внешнее воздействие в виде алюминиевых стержней для усиления отвода тепла).

Задача об определении стационарного температурного поля $t(\mathbf{r}) = t(r, \theta, \varphi)$ представляет собой уравнение второго порядка в частных производных эллиптического типа для кусочно-гладкой сферически-симметричной среды (рис. 1) с постоянными коэффициентами теплопроводности: в области I ($0 < r < r_1$) имеется источник тепла в виде тепловыделяющего шара с постоянной объемной тепловой плотностью q_v , и температурное поле t_1 удовлетворяет неоднородному уравнению; в областях II ($r_1 < r < r_2$), III ($r_2 < r < r_3$), IV ($r_3 < r < r_4$) и V ($r_4 < r < r_5$) источники тепла отсутствуют, и уравнения для температурных полей t_j ($j = 2, 3, 4, 5$) однородные. Базовая (БМ) и ограниченная нелинейная (ОНМ) модели были реализованы в [9]. Используя изложенные там подходы, рассмотрим другие модели.

УЧЕТ КОНТАКТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Несмотря на то, что ядерные энергетические объекты выполняются с высоким качеством поверхностной обработки поверхностей, во многих случаях при тепловых расчетах конструкций имеется необходимость учета термического сопротивления контакта металлических поверхностей, обусловленного дискретным характером соприкосновения [13]. Наличие такого сопротивления приводит к температурному скачку между соприкасающимися поверхностями и увеличению общего температурного перепада в составных деталях (дополнительное повышение температуры может составлять десятки и даже сотни градусов). В результате оказывается невозможным пренебречь термическим контактным сопротивлением.

Для учета теплового эффекта, обусловленного термическим контактным сопротивлением, переформулируем базовую модель и решим в новой постановке задачу об определении стационарного температурного распределения $t(r)$ в многослойном сферическом устройстве с твэлом, которая была решена в [9]. Учет контактного сопротивления производится с помощью введения четырех дополнительных оболочек (примем, что их толщина составляет $d = 2 \cdot 10^{-5}$ м и они заполнены аргоном, что является характерным для ядерных объектов [13]), расположенных между слоями основных материалов. В этом случае математически решаемая задача аналогична базовой [9, 10] и отличается от нее только количеством оболочек.

При этом решение уравнения теплопроводности имеет вид [9]

$$\begin{aligned}
 t_1(r) &= \frac{C_1}{r} - \frac{\rho}{6 \cdot k_1} \cdot r^2, \\
 t_j(r) &= C'_j + \frac{C_j}{r} \quad (j = 2, 3, 4, 5), \\
 t_{j^*}^*(r) &= C_{j^*}' + \frac{C_{j^*}^*}{r} \quad (j^* = 1, 2, 3, 4),
 \end{aligned}$$

где t_1 и t_j описывают температурное поле в основных оболочках, $t_{j^*}^*$ – в дополни-

тельных. Результат реализации модели (МКС) – аналитические решения краевых задач для граничных условий I и III рода и данные о температурах в характерных точках устройства (табл. 1).

Таблица 1

**Значения температур в характерных точках
для всех технологий и моделей (в °C)**

	$r = 0$	$r = r_1$	$r = r_2$	$r = r_3$	$r = r_4$	$r = r_5$
«Low Technology»						
БМ	387.78	367.41	356.83	355.84	43.07	42.99
МКС	404.60	384.24	361.44	356.81	43.18	42.99
ОНМ	403.04	382.67	372.09	371.10	43.17	42.99
ПНМ	403.82	366.17	355.71	354.78	43.07	42.99
ПНК	419.83	382.96	360.30	355.77	43.20	42.99
МИГ	387.94	367.57	356.99	356.00	43.24	43.24
МИТ	419.72	399.35	375.91	374.86	43.27	42.99
МВВ	277.33	256.97	246.39	245.40	43.14	42.99
«Medium Technology»						
БМ	466.38	446.01	435.43	434.78	62.21	61.99
МКС	483.99	463.63	440.83	436.54	62.48	61.99
ОНМ	489.57	469.20	458.62	457.97	62.64	61.99
ПНМ	475.06	440.65	430.67	430.06	62.21	61.99
ПНК	491.93	458.20	436.07	431.83	62.50	61.99
МИГ	466.77	446.40	435.82	434.17	62.64	62.39
МИТ	513.36	492.99	469.25	468.54	62.70	61.99
МВВ	255.44	235.07	224.49	223.84	62.27	61.99
«High Technology»						
БМ	371.04	350.67	340.09	339.65	130.03	128.99
МКС	389.98	369.61	346.81	342.73	131.16	128.99
ОНМ	384.54	364.17	353.59	353.14	131.70	128.99
ПНМ	400.23	362.39	351.91	351.49	129.97	128.99
ПНК	418.37	381.43	358.77	354.71	131.22	128.99
МИГ	372.53	352.17	341.59	341.14	131.67	130.49
МИТ	396.87	376.50	353.13	352.65	131.85	128.99
МВВ	184.59	164.23	153.65	153.20	130.28	128.99

ПОЛНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ

Как следует из анализа базовой модели [9, 10], в области IV температура убывает очень сильно, и, следовательно, для этой области необходимо использовать модель, которая учитывала бы зависимость коэффициента теплопроводности λ_4 от температуры, что было выполнено в [9]. Представляет интерес рассмотрение так называемой полной нелинейной модели (ПНМ) теплопроводности в устрой-

стве, в рамках которой учитывается зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для всех оболочек. В этом случае модель становится более согласованной, а полученные в рамках модели результаты будут применимы для любых (физически и технически оправданных) значений температур без дополнительных операций, учитывающих реальные изменения коэффициентов теплопроводности материалов.

Учет зависимостей коэффициентов теплопроводности от температуры (в случае, когда эти зависимости известны) можно в общем случае осуществить введением переменной Кирхгофа [12, 15, 16]. Возможно также решение нелинейного уравнения теплопроводности с линейной зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры. Для рассматриваемой модели зависимости для материалов II, III и V оболочек известны [14]; сложное химическое вещество IV оболочки содержит компоненты, у которых коэффициенты теплопроводности различным образом зависят от температуры (так что для полной теплопроводности известно только оценочное значение [2, 8]).

Как показывает анализ данных, для материалов устройства можно использовать модель теплопроводности, в которой соответствующие коэффициенты зависят от температуры линейно. Таким образом, модель становится полностью нелинейной для всех оболочек, а математическая задача об определении температурного поля $t(\mathbf{r}) = t(r, \theta, \varphi)$ в устройстве сводится к нелинейному уравнению второго порядка в частных производных эллиптического типа для кусочно-гладкой сферически-симметричной среды с кусочно-гладкой объемной тепловой плотностью q_v .

В рамках полной нелинейной модели для коэффициентов теплопроводности Λ_j ($j = 1, 2, 3, 4, 5$) принимается зависимость от температуры вида

$$\Lambda_j = \kappa_j \cdot t_j(r) + \lambda_j; \quad (1)$$

температурное поле u_1 в оболочке I удовлетворяет уравнениям ($i = 2, 3, 4, 5$)

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\Lambda_1(t_1) \cdot \operatorname{grad} t_1) + q_v &= 0, \\ \operatorname{div}(\Lambda_i(t_i) \cdot \operatorname{grad} t_i) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для сферически-симметричного случая $t_j(r, \theta, \varphi) = t_j(r)$ с учетом формул (1) решения уравнений (2) имеют вид

$$\begin{aligned} t_1(r) &= -\lambda_1 / \kappa_1 + \sqrt{9 \cdot \lambda_1^2 \cdot r^2 + 3 \cdot \kappa_1 \cdot (6 \cdot r \cdot C_1 - 6 \cdot r^2 \cdot C'_1 - r^4 \cdot q_v)} / (3 \cdot \kappa_1 \cdot r), \\ t_i(r) &= -\lambda_i / \kappa_i + \Sigma_i(r) / (\kappa_i \cdot r), \quad \Sigma_i(r) = \sqrt{\lambda_i^2 \cdot r^2 + 2 \cdot \kappa_i \cdot (r^2 \cdot C'_i - r \cdot C_i)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где C_i и C'_i – постоянные, определяемые из условий регулярности и непрерывности температурного поля $t(r)$ для разных типов краевых условий. Результат реализации модели ПНМ – аналитические решения I и III краевых задач, данные о температурах в характерных точках устройства (табл. 1) и визуализации температурного поля на рис. 2а. Заметим, что в ПНМ предполагается линейная зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры. Для IV слоя используются численные значения из [9], а для нахождения κ_i и λ_i (в остальных оболочках) применен метод линейной регрессии в системе Mathcad для справочных данных из [14].

ПОЛНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Рассмотрим модель устройства, в которой помимо зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры учитывается наличие контактного термического сопротивления (ПНК). Аналитическое решение получается по схеме, изложенной для модели ПНМ, с добавлением четырех дополнительных межоболочеч-

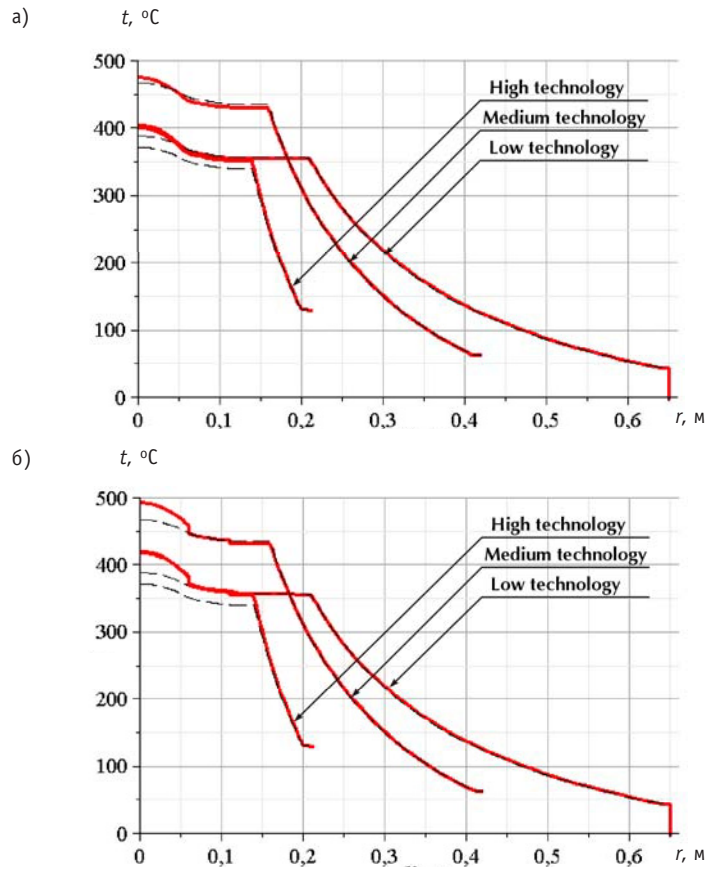


Рис. 2. Температурные распределения для моделей ПНМ (а) и ПНК (б). Здесь и далее пунктиром приведен график для модели БМ; исходные параметры соответствуют данным [2, 8]

ных слоев, как в модели МКС. При этом температурное распределение во всей конфигурации представляется кусочно-гладкой функцией, состоящей из девяти звеньев; ограничимся визуализацией полученных решений (рис. 2б). Как видно, температурные распределения для модели ПНК выше, чем для базовой модели. Значения температур в характерных точках для всех технологий приведены в табл. 1.

УЧЕТ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим в рамках линейной модели граничные условия для устройства, которые помимо конвективного теплообмена с внешней средой (температура которой равна T_{ext}) учитывают радиационный теплообмен между внешней поверхностью и стенками помещения (модель МИГ), температура которых равна t_{ext} .

В этом случае решения уравнений для температурного поля аналогичны решениям БМ, а граничное условие конвективного теплообмена должно быть заменено на выражение

$$\left. \frac{\partial t_5(r)}{\partial r} \right|_{r=r_5} = h \cdot (T_{ext} - t_5(r)) \Big|_{r=r_5} + H \cdot (t_{ext}^4 - t_5^4(r)) \Big|_{r=r_5}, \quad (4)$$

где $H = \varepsilon_A \cdot S \cdot \sigma$; ε_A – излучательная способность материала; S – площадь поверхности излучения; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Получаемая система уравнений для постоянных C_i с учетом условия (4) имеет четвертый порядок; средства пакетов позволяют получить аналитические реше-

ния этого уравнения и выбрать положительное действительное решение, соответствующее физическому смыслу задачи; тем самым для рассматриваемой краевой задачи получено аналитическое решение (это решение громоздко и здесь не приводится). Данные о температурах в характерных точках устройства в модели МИГ приведены в табл. 1.

Рассмотрим также модель устройства, в которой помимо контактного сопротивления учитывается наличие излучения на поверхности твэла (модель МИТ). Учет этого фактора является важным, поскольку поверхность устройства имеет самую высокую температуру. Тепловое излучение имеет место в тонкой прослойке между твэлом и второй оболочкой (заполненной аргоном). В этом случае условие непрерывности теплового потока в дополнительной оболочке между поверхностью твэла и второй оболочкой записывается как

$$\lambda^* \cdot \frac{\partial t_1^*(r)}{\partial r} \Big|_{r=r_1^*} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial t_2(r)}{\partial r} \Big|_{r=r_1^*} + H \cdot (t_2^4(r) - t_1^{*4}(r)) \Big|_{r=r_1^*}, \quad (5)$$

где t^* определено в пространстве между твэлом и второй оболочкой. Ход решения задачи с учетом условия (5) в целом аналогичен предыдущему, поэтому ограничимся только численными результатами и их визуализациями (рис. 3а, табл. 1).

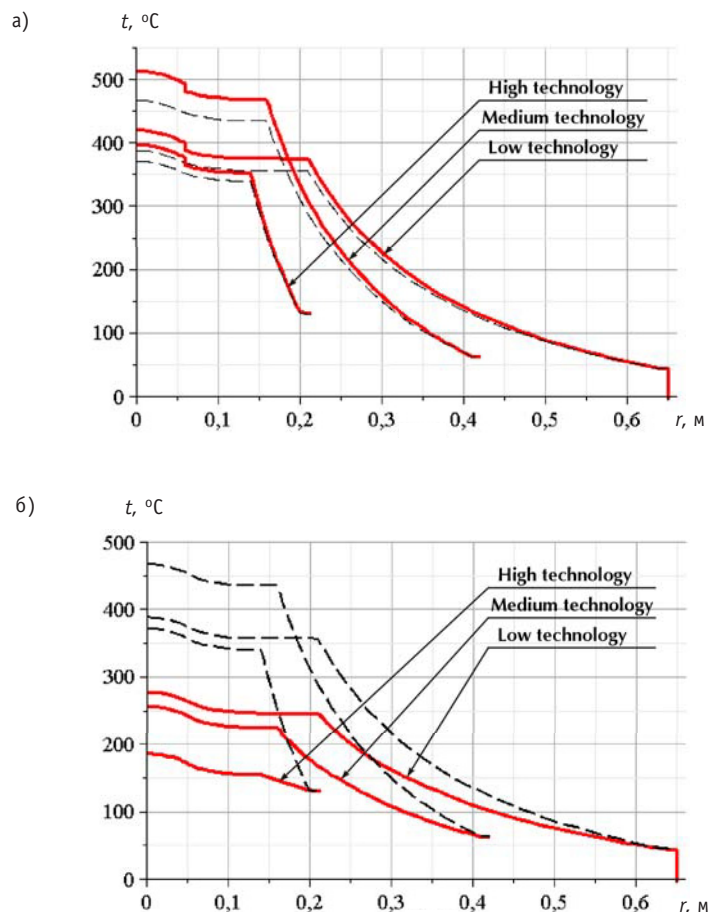


Рис. 3. Температурные распределения для моделей МИТ (а) и МВВ (б)

УЧЕТ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УСТРОЙСТВО

Для обеспечения безопасного хранения подобных устройств помимо внутренних факторов, воздействующих на них, в работе [17] был предложен учет внешнего воздействия от алюминиевых стержней, вводимых в устройство. Такие стержни (диаметром $d = 1$ см) могут служить дополнительным фактором для отвода тепла. В работе [17] численный расчет такой модели проводился в программном комплексе на основании метода конечных элементов. При малом количестве стержней дополнительно отводимый поток тепла невелик; ожидаемый значительный эффект может быть достигнут при достаточно большом числе таких стержней. В этом случае (при однородном и симметричном расположении) влияние стержней можно смоделировать как некоторое увеличение коэффициента теплопроводности четвертой оболочки (теплопроводность ее мала, а остальные оболочки имеют большой коэффициент теплопроводности).

Для более детального учета рассматриваемого фактора оболочку IV можно, в свою очередь, разбить на несколько слоев и для каждого слоя провести учет влияния стержней (дело в том, что эффективное изменение коэффициента теплопроводности будет изменяться по радиусу, поскольку ввиду сферической симметрии устройства количество алюминия, влияющего на теплопроводность IV оболочки, будет уменьшаться с увеличением радиальной координаты).

Зададим эффективные коэффициенты теплопроводности для слоев IV оболочки следующим образом:

$$\lambda_{4,i} = \lambda_4 + \varepsilon_i \cdot \lambda_3, \quad (6)$$

i – номер слоя; $\varepsilon_i = n \cdot V_i / (V_{4,i} - n \cdot V_i)$ – коэффициент, зависящий от соотношения объема стержней и слоя, где $V_{4,i}$ – объем подоболочки; V_i – объем стержня, проходящего через эту подоболочку; n – число стержней.

Математически задача о расчете такой модели аналогична рассмотренной в базовой модели; отличие заключается в количестве рассматриваемых оболочек (что зависит от количества слоев IV оболочки) и учете эффективных коэффициенты теплопроводности (6) в слоях этой оболочки. Для иллюстрации эффекта приведем данные для $n = 20$ стержней с разбивкой IV оболочки на три слоя (табл. 1, рис. 3б). Как видно, введение в устройство алюминиевых стержней приводит к значительному снижению температурного поля в устройстве. Результаты (аналитические расчеты и характерные параметры устройства) в целом соответствуют результатам работы [22], однако они получены в рамках более простой аналитически решаемой модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Анализ результатов, полученных для разных моделей и технологий температурных распределений (табл. 1), и их сравнение с данными базовой модели показывают: для всех моделей (кроме MBV) температурные распределения выше, чем для базовой модели. Это означает, что при учете факторов (характеризующих конкретные модели) содержание денатурирующего элемента в твэлах может быть снижено на 4.1–7.4% в модели МКС (в зависимости от технологии) по сравнению с данными, предполагаемыми для базовой модели [2, 8, 9], на 4.5–5.7% в модели ОНМ, на 8.6–9.2% в модели ПНМ, на 12.7–19.2% в модели ПНК, на 9.3–17.4% в модели МИТ, на 4.5–5.7% в модели MBV; для модели MBV температурное распределение ниже, чем для базовой модели. Это означает, что при учете факторов (характеризующих модель MBV) содержание денатурирующего элемента может быть увеличено на 31.9–76.5%.

Полученные результаты для базовой модели соответствуют результатам [2, 8], для аналитической модели MBV – [19].

Таким образом, в работе в рамках аналитических методов построены модели устройства, учитывающие большой спектр разных факторов. Особенно сильное влияние имеют контактное сопротивление, зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры и внешнее воздействие алюминиевых стержней. Такие реалистичные модели позволяют смоделировать широкий спектр условий хранения, при которых возможно как уменьшение температурного поля, так и его увеличение. Хотя температурное поле устройства оказывается чувствительным к различным факторам, возможно дать адекватную оценку для состава тепловыделяющего элемента в зависимости от конкретных условий хранения и технологии устройства.

Данная работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Kessler G. et al. Direct Disposal Versus Multiple Recycling of Plutonium/Proc. of the Int. Conf. and Technology Exposition on Future Nuclear Systems: Emerging Fuel Cycles and Waste Disposal Options: Global'93, Seattle, Washington, 1993. – P. 277 & 280.
2. Kessler G. Analysis for a Future Proliferation Resistant Plutonium//Atomwirtschaft. – 2006. – 51.
3. Kessler G. et al. Moderne Strategien zur Beseitigung von Plutonium//Atomwirtschaft. – 2001. – 46.
4. Kessler G. Requirements for Nuclear Energy in the 21st Century//Prog. Nuc. Energy. – 2002. – 40, 3-4. – P. 309.
5. Mark J. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium//Science & Global Security. – 1993. – 4. – 111.
6. Mark J. C. Explosive properties of reactor-grade plutonium//Scien. and Glob. Security. – 1992. – V.3. – P. 1-13.
7. Kessler G. Analysis for a Future Proliferation Resistant Plutonium//Atomwirtschaft. – 2006. – 51.
8. Kessler G. Plutonium Denaturing by ^{238}Pu //Nuclear Science and Engineering. – 2007. – V. 155. – № 1. – P. 53-73.
9. Тихоненко А.В. Модельный анализ температурных полей в многослойном сферически-симметричном устройстве//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №2. – С. 110-118.
10. Тихоненко А.В. Реализация математических моделей теплопроводности и комплекс программ в Maple для расчета тепловых полей в многослойном устройстве с тепловыделяющим элементом//Электронный журнал «Исследовано в России». – 2008. – 25. – С. 290-300.
11. Тихоненко А.В. Реализация математических моделей теплопроводности и анализ тепловых полей в многослойном устройстве/Труды III Межд. конф. «Математические идеи П.Л. Чебышёва и их приложение к современным проблемам естествознания». Обнинск, 14-18 мая 2006 г. – Обнинск: ИАТЭ, 2008. – С. 157-166.
12. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 593 с.
13. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
14. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник/Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
15. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
16. Чарный И. А. О методах линеаризации нелинейных уравнений теплопроводности//Изв. АН СССР. ОТН. – 1951. – № 6. – С. 829-843.
17. Storm M.L. Heat conduction in simple metals//Jr. Appl. Phys. – 1951. – 22. – P. 940-951.
18. Wiedeburg O. Ober die Hydrodif fusion//Annalen der Physik Chemik. – 1879. – 39. – 675.
19. Artisyuk V., Nikitin K. On plutonium proliferation resistance criteria: effect of thermal bridges on NED cooling. NPP and Safety and personal training. X Int. Conf. Abs. Part 1. – Obninsk: INPE, 2007. – P. 94-95.

Поступила в редакцию 30.06.2009

phase method in a contour with heavy lead-bismuth coolant is experimentally shown.

Techniques of definition of dynamic parameters of the automatic control system are developed and tested, tests for justification of system serviceability in steady-state conditions of nonisothermal circulating circuit, and also in conditions of a various types of the «provocations» deducing a circuit of the facility from an equilibrium condition on oxidizing potential of the coolant are carried out.

УДК 621.534: 519.7

Realization of the multiple-factor models of thermal conductivity in the multi-layer spherically symmetrical device with fuel element \ A.V. Saenko, A.V. Tikhonenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 19 titles.

Mathematical models of the thermal stationary conductivity in the multi-layer spherically symmetrical device with fuel element are realized for different physical and technological conditions. Boundary-value problems on the thermal field calculation are solved with program system and recommendations on composition of fuel element are formulated.

УДК 536.24: 621.039.534

Thermo-Hydraulic Calculation of the Sodium-Water Steam-Generator for the Case of Steam-Generating Tube Removal and Plugging \ V.V. Hudasko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 11 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 17 titles.

A procedure for the thermo-hydraulic calculation of the sodium-water steam-generator is presented for the case of stem-generator tube removal and plugging. A comparison is given of the calculated data with the experimental ones. Good agreement has been obtained between the calculated and experimental data

УДК 621.039.534.6: 536.24

About Required Determination Accuracy of the Liquid-Metal Coolant Properties in the Fast Reactors \ Y.S. Yuriev, I.T. Afanasieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages. – References, 7 titles.

The formulas to calculate temperature deviation of the fuel elements as a result of coolant property uncertainty have been obtained. The dispersive method was used to estimate comparatively the contribution of different deviation components. The conclusion about significance of geometric fuel element tolerances, a reactor power deviation, a heat capacity and a coolant density has been drawn.

УДК 621.311.25: 621.039

Model of the Turbine Stage \ A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 7 titles.

For calculations in real time the dynamics of NPP turbine department it is necessary to have model of the turbine stage. Due to permanent growth of the requirements to improve the accuracy of NPP simulator the problem arises to create model with accuracy 1% for the description of parameters of turbine stage. The present model is valid for all mode of operation for real time simulation. Results of calculations were compared with known data for some NPP turbines. It proves that the presented model of the turbine meets the requirements on the accuracy if there are data available about the turbine blade's angle for all turbine stages.

УДК 621.039.534

Mathematical Model of Processes in the Cut not Tight Steam Generator as a Part of the Operating Ship Reactor's Installation \ V.I. Korolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 illustrations. – References, 1 title.

While in service reactor's installation of a nuclear vessel regular depressurization of trumpet system of direct-flow steam generators is observed. For a non-admission of hit of the active heat-carrier in a steam-and-water cycle, a current steam and gas generator it is reliably cut on the second contour. Further the heat-carrier arrives in trumpet system of the cut steam and gas generator and at a given time completely fills its internal volume. After that moment restrictions on maneuvering are entered into avoidance неопределенности a steam and gas generator because of water expansion in the closed space. It is necessary to define the beginning of this moment. In article the mathematical model of process of growth of pressure in trumpet system of the cut not tight steam generator is developed at work reactor's installation at power levels of capacity.