

УДК 621.039.526

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ОТРАБОТАВШИХ ТВС РЕАКТОРОВ ПЕРВОЙ ОЧЕРЕДИ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС В УСЛОВИЯХ «СУХОГО» ХРАНЕНИЯ

С.В. Богатов, В.П. Забегаев, А.И. Карпенко, Е.Л. Розенбаум
Белоярская АЭС, г. Заречный



Статья содержит расчетно-экспериментальные исследования температурного режима штатного чехла с 35 ОТВС при его сухом хранении в технологической шахте. Исследования показали, что разогрев от остаточного тепловыделения не приводит к чрезмерному росту температуры даже в условиях полного отсутствия теплоотвода вентиляцией.

Ключевые слова: отработавшие ТВС, охлаждение, «сухое» хранение, температурный режим, шахта.

Key words: irradiated fuel sub-assemblies, cooling, dry storage, temperature behaviour, pit.

Отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) реакторов первой очереди Белоярской АЭС после вывода их из эксплуатации были полностью выгружены и находятся на хранении в бассейнах выдержки (БВ). Переход на «сухое» хранение ОТВС может быть обусловлен необходимостью опорожнения бассейнов при появлении неконтролируемых протечек. Для обоснования возможности «сухого» хранения ОТВС специалистами Белоярской АЭС проведены расчетно-экспериментальные исследования температурного режима при сухом хранении штатного чехла с 35 ОТВС в технологической шахте ТШ1 блока № 2.

Технологические шахты (ТШ) центральных залов (ЦЗ) первой очереди Белоярской АЭС были предназначены проектом для хранения аварийных каналов, специального инструмента и приспособлений, используемых при ремонтно-восстановительных работах на реакторах.

ТШ представляет собой корпус, основной частью которого является стальная труба $\varnothing 820 \times 10$, вмонтированный в цилиндрические вертикальные проходки в массиве монолитного железобетона, разделяющего шахту реактора и помещения бассейна выдержки ОТВС. ТШ оборудованы системой дренирования и вентиляции. Сверху ТШ закрывается защитной крышкой.

Для натурных исследований модели «сухого» хранения ОТВС и определения температурного режима в шахту для хранения аварийных каналов, расположенную в ЦЗ-2 первой очереди, был установлен чехол № 246 с 35-ю ОТВС.

© С.В. Богатов, В.П. Забегаев, А.И. Карпенко, Е.Л. Розенбаум, 2009

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА

Для определения температурного режима бетона при сухом хранении отработавших каналов реактора АМБ-200 был выполнен расчет чехла № 246. В отчете [1] была определена мощность остаточного энерговыделения всех каналов в БВ2, в том числе и находящихся в чехле № 246. На конец 1995 г. остаточное энерговыделение данного чехла составляло 350 Вт. Перерасчет энерговыделения на конец 2001 г. дал величину 132,7 Вт.

Начальная температура в шахте и собственно материала шахты (бетон и облицовочный металл) составляла $\sim 22^\circ\text{C}$.

После установки в шахту чехла с каналами в ней начинаются нестационарные процессы теплопроводности, характеризующиеся изменением температуры t во времени τ , заключающиеся в следующем:

- разогрев каналов и металла чехла в газовой среде за счет внутренних источников тепла;
- разогрев воздуха в шахте за счет конвективного теплообмена;
- передача тепла облицовочному металлу шахты и бетону за счет конвективного теплообмена и теплового излучения;
- разогрев массы бетона шахты за счет теплопередачи;
- охлаждение бетона за счет конвективного теплообмена между наружной стенкой шахты и окружающим воздухом.

При установившемся стационарном режиме (т.е. при $\tau \rightarrow \infty$) все тепло, выделяемое в чехле, будет отводиться через наружную поверхность шахты, и можно определить предельные значения температуры бетона [2–4].

Максимальный перепад температур между наружной поверхностью шахты (t_{hi}) и воздухом определяется путем итерационных расчетов по формулам (1)–(4). Сначала по критериальным зависимостям определяется коэффициент теплоотдачи в большом объеме газа. Критерий Грасгофа равен

$$Gr_{hb} = \frac{\beta_b \cdot h^3 \cdot g \cdot \Delta t_i}{\nu_b^2}, \quad (1)$$

где β_b , $1/\text{K}$ – температурный коэффициент объемного расширения воздуха при средней температуре $(t_{hi} + 22)/2$; h , м – высота наиболее эффективного теплообмена; g , м/с^2 – ускорение свободного падения; $\Delta t_i = t_{hi} - 22$, $^\circ\text{C}$ – начальный перепад температур; ν_b , $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха при средней температуре $(t_{hi} + 22)/2$.

В зависимости от величины произведения критериев Грасгофа и Прандтля определяется критерий Нуссельта

- при $10^3 < Gr_{hb} \cdot Pr_b < 10^9$ (ламинарный режим)

$$Nu_b = 0,76 \cdot (Gr_{hb} \cdot Pr_b)^{0,25}; \quad (2a)$$

- при $Gr_{hb} \cdot Pr_b > 10^9$ (турбулентный режим)

$$Nu_b = 0,15 \cdot (Gr_{hb} \cdot Pr_b)^{0,33}. \quad (26)$$

Таким образом,

$$\alpha_{KH} = Nu_b \cdot \lambda_b / h, \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

здесь λ_b , $\text{Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Далее с помощью проверочного расчета определяется новый перепад температур между наружной поверхностью шахты и воздухом и сравнивается с заданным:

$$\Delta t_{i+1} = N_{ост} / (\alpha_{KH} \cdot F_6), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (4)$$

где $N_{ост}$, Вт – мощность остаточного энерговыделения каналов в чехле (132,7 Вт); F_6 , м^2 – площадь наружной поверхности шахты.

Путем данного итерационного расчета определен максимальный перепад температур, который при принятой высоте наиболее эффективного теплообмена 6 м составил величину $\sim 1^\circ\text{C}$. Следовательно, температура наружной стенки шахты равна $\sim 23^\circ\text{C}$.

Для определения температуры внутренней поверхности бетона шахты использована формула для теплопроводности через цилиндрическую стенку:

$$t_{вн} = t_n + \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\lambda_{\beta}} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{вн}}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (5)$$

где $q_l = N_{осм}/h = 132,7/6 \approx 22,1$ Вт/м – удельный тепловой поток через стенку; $\lambda_{\beta} = 0,9$, Вт/м $\cdot^\circ\text{C}$ – коэффициент теплопроводности бетона плотностью 2300 кг/м 3 ; $d_{вн}$, d_n , м – внутренний и наружный диаметры бетона шахты (0,82 и 3,6 м).

Определенная по формуле (5) температура внутренней поверхности шахты составила $28,8^\circ\text{C}$.

Перепад температуры на толщине металлической облицовки шахты (0,01 м) рассчитывается также по формуле (5) при $\lambda_{ст} = 58$ Вт/м $\cdot^\circ\text{C}$ и составляет очень малую величину ($< 0,1^\circ\text{C}$).

Температуру воздуха внутри шахты определяли итерационными расчетами по формулам (1)–(4), приняв начальный перепад температур за $\Delta t_j = t_{вн} - 28,8^\circ\text{C}$. Свойства воздуха выбираются для соответствующих температур. Результирующий перепад температур составил $\sim 1,1^\circ\text{C}$.

Таким образом, установившаяся температура воздуха в шахте должна составить $\sim 29,9^\circ\text{C}$.

Результаты расчетов температурного режима шахты при установке в нее чехла с отработавшими каналами мощностью 132,7 Вт для установившегося стационарного режима теплообмена представлены на рис. 1.

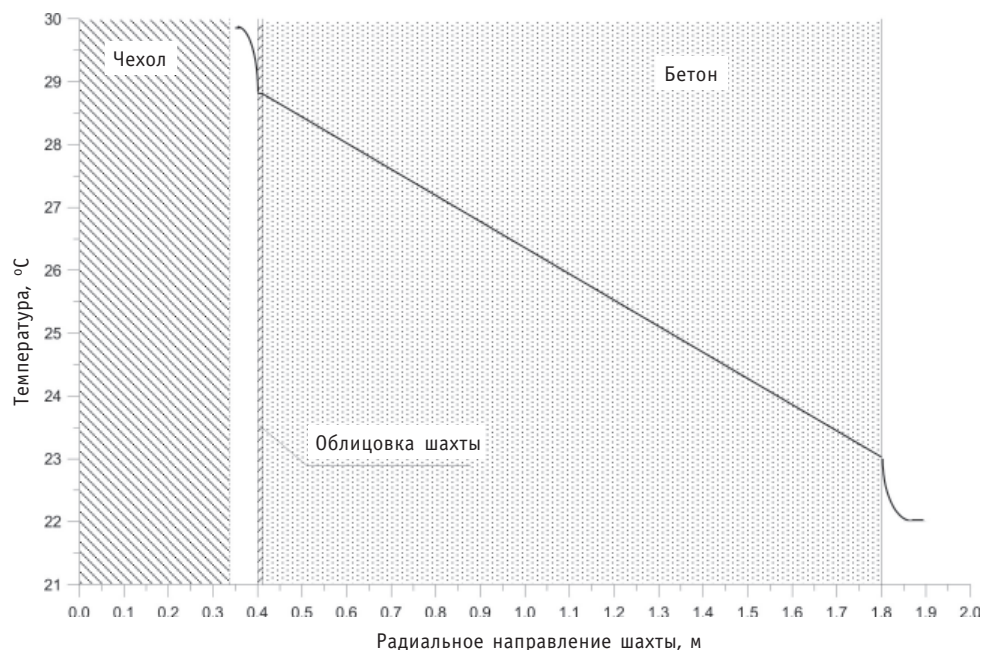


Рис. 1. Предельные температуры по радиусу шахты для хранения аварийных каналов при установившемся режиме теплообмена

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ОТВС В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ШАХТЕ № 1 ЦЗ-2

Для экспериментального подтверждения результатов расчетов были проведены непосредственные измерения температурного режима технологической шахты ТШ1 блока № 2 с установленным в ней 35-местным чехлом № 246, заполненным отработавшими ТВС.

Для выполнения измерений был изготовлен термозонд, в состав которого входят три термоэлектрических преобразователя ТХА 2076 по ГОСТ 661674 и один термометр сопротивления Гр.23. Термометр сопротивления подключен к автоматическому самопишущему мосту сопротивления КСМ2 (кл. 0,5), а термопары – через блок холодных спаев и переключатель выбора измерительного канала к комбинированному цифровому прибору Щ3011 (кл. 0,06).

Размещение точек контроля вдоль образующей ТШ1 (рис. 2) соответствует следующей привязке относительно центра активной зоны ОТВС, установленных в чехле:

ТЭП № 1 – ($L=9$ м от головки канала) центр а.з., отм. 6,60;

ТЭП № 2 – ($L=6$ м от головки канала) верх а.з., отм. 9,60;

ТЭП № 3 – ($L=3$ м от головки канала) на 3 м выше а.з., отм. 12,60.

Место расположения термометра сопротивления совмещено с ТЭП № 2.

Температура свободных концов ТЭП поддерживалась близкой 0°C путем помещения их в термостат с тающим льдом. Контроль температуры в термостате осуществлялся лабораторным термометром ТЛ7а, № 301, ГОСТ 224571 (цена деления $0,2^{\circ}\text{C}$).

Измерения в первые 10 суток выполнялись непрерывно автоматическим самопишущим мостом (запись на диаграммной ленте) и периодически (2–12 часов) комбинированным цифровым прибором. Перевод показаний милливольтметра в температуру производился по «Номинальным статическим характеристикам преобразования» (ГОСТ Р 8.5852001). В дальнейшем измерения выполнялись с различной периодичностью от 1 раза в сутки до 1 раза в месяц.

Измерения температуры в ТШ1 были начаты 14.12.2001. Температура в пустой шахте на начало измерений составила $23,4; 21,9; 21,4^{\circ}\text{C}$, начиная с нижней точки соответственно.

В 10:30 17.12.2001 в ТШ1 был установлен чехол № 246, а устье шахты было закрыто теплоизоляционными матами и крышкой.

Наблюдения за изменением температуры в ТШ1 велись в течение 37 суток. Результаты наблюдений представлены на рис. 3.

Максимальная скорость разогрева наблюдалась после переукладки теплоизоляции и составляла $\sim 3^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. В дальнейшем она снизилась, и к истечению десятых суток рост температуры практически прекратился.

Установившийся температурный режим в ТШ1 составил $31, 31$ и 27°C снизу вверх соответственно.

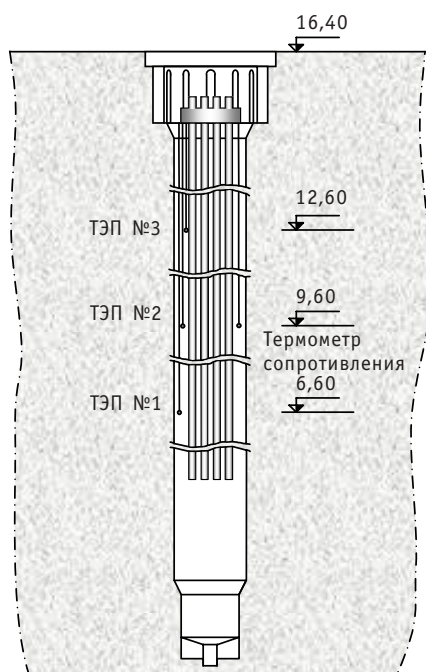


Рис. 2. Схема расположения точек контроля в ТШ1

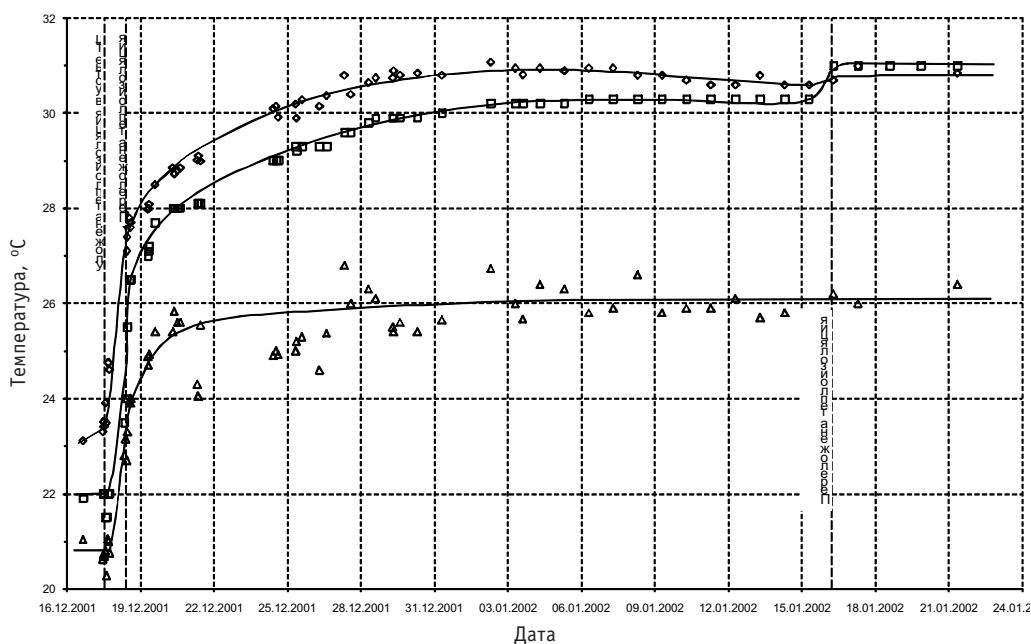


Рис. 3. Изменение температуры воздуха в ТШ1 с установленным в ней чехлом № 246: \diamond – Т1 отм. 6,60 м (центр а.з.); \square – Т2 отм. 9,60 м (верх а.з.); \triangle – Т3 отм. 12,60 м

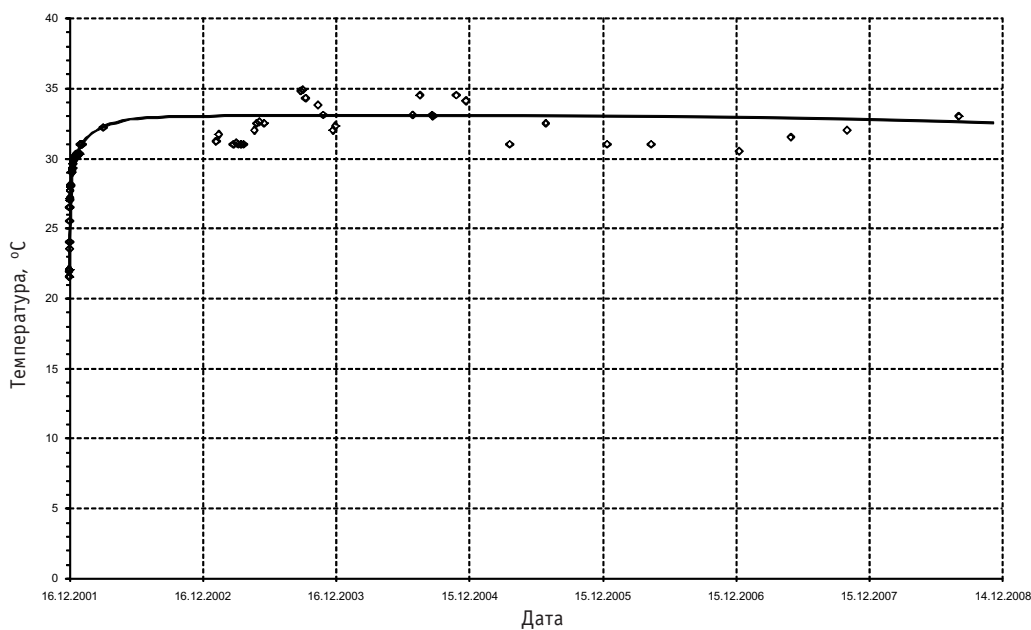


Рис. 4. Изменение температуры воздуха в ТШ-1 с установленным в ней чехлом № 246 (по показаниям термометра сопротивления отм. 9,6 – верх а.з.)

Для контроля установившегося температурного режима в течение 2003–2008 гг. проводились периодические измерения термометром сопротивления (Т2). Результаты наблюдений представлены на рис. 4.

ВЫВОДЫ

Расчет температурного режима технологической шахты с установленными в нее ОТВС суммарной мощностью ~133 Вт показал, что в установившемся режиме предельные температуры составят:

- воздух в шахте ~30°C;
- внутренняя поверхность покрытия шахты ~29°C;
- наружная поверхность стен шахты ~23°C.

Экспериментальные исследования подтвердили результаты расчетов.

1. Разогрев 35-местного чехла с ОТВС от остаточного тепловыделения суммарной мощностью ~133 Вт, установленного в сухую технологическую шахту, не приводит к чрезмерному росту температуры даже в условиях полного отсутствия теплоотвода вентиляцией. Выход на установившийся уровень температур воздуха в шахте происходит за период около 10 суток.

2. Установившаяся максимальная температура воздуха в ТШ1, наблюдаемая на уровне центра активной зоны ОТВС, составила ~31°C, что практически совпадает с результатами расчетных исследований, по результатам которых температура воздуха в шахте составляет ~30°C.

3. Измерения термометром сопротивления продолжались с января 2003 г. по август 2008 г. Наблюдения показали, что температура в ТШ1 практически осталась на прежнем установившемся уровне (31–35°C).

Литература

1. Расчетный анализ теплового режима бассейнов выдержки первой очереди Белоярской АЭС и радиационной обстановки над перекрытием бассейнов при сухом хранении отработавших ТВС/ГНЦ РФ-ФЭИ. Отчет о НИР. Инв. №9119, 1995 г.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи – М.: Энергия, 1973.
3. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцов Б.Т. и др. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник/Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина – М.: Энергоиздат, 1982 (Теплоэнергетика и теплотехника).
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник – М.: Атомиздат, 1968 г.

Поступила в редакцию 15.05.2009

УДК 621.039

Implementation of the Decommissioning Programmes of Beloyarsk NPP Power Units 1 and 2/N.N. Oshkanov, V.F. Roslyakov, B.I. Chubarov, V.A. Makhov, E.A. Vinivitin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

The article overviews the generalized list of the work presently in hand under the programmes of the decommissioning of Beloyarsk NPP power units 1 and 2.

УДК 621.039:519.7

Development of the optimal algorithms of the NPP decommissioning using the methods of mathematical simulation/O.L. Tashlykov, A.N. Seseikin, S.E. Shcheklein, A.G. Chechentsov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 8 titles.

The required scope of the source information on the radiation background in the power unit premises for the development of the systems of the optimal NPP decommissioning planning is determined.

The ways are proposed to increase the efficiency of utilization of the obtained information on the radiation background for optimization of the sequence of the dismantling of the radioactive equipment by means of the mathematical simulation in order to minimize exposure and material costs.

УДК 621.039.526

Research into the Temperature Behaviour of the Irradiated Fuel Sub-Assemblies of the First Phase of the Beloyarsk NPP under the conditions of the «Dry» Storage/S.V. Bogatov, V.P. Zabegaev, A.I. Karpenko, E.L. Rozenbaum; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

The article presents the computational and the experimental investigations of the temperature behaviour of the standard cask holding thirty five irradiated fuel sub-assemblies under the dry storage in the process pit. Research showed that the heat-up due to the residual heat did not cause the excessive growth of temperature even under the conditions of the complete absence of the heat removal by ventilation.

УДК 621.039.548

Methodology and Results of the Operational Calculation of the Temperature of the Fuel in the Fuel Pins of the BN-600 Reactor Fuel Sub-Assemblies/S.V. Bogatov, M.G. Kireev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 9 titles.

The article presents the methodology of the determination of the peak fuel temperature and computational investigations of the temperature behaviour of the fuel in the fuel pins of the fuel sub-assemblies of various types during the BN600 reactor operation. The effect of the sodium uranate in the gap between fuel and cladding of the fuel pin on the heat transfer processes is considered.

УДК 621.311.25:621.039

Features of the Vibration Conditions of the Pumping Units of the Primary Sodium Pumps of the BN-600 Power Unit under the conditions of Two-Loop Operation/E.Yu. Badanin, P.P. Govorov, V.A. Drozdenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 4 pages, 2 illustrations. – References, 5 titles.

The article presents the results of the investigation of the vibration conditions of the pumping components of the primary sodium pumps under the two-loop operation of the power unit. The comparative analysis has been conducted, and the distinctive features of the conditions of the pumping component operation under these circumstances have been found.