

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СБОРОК БН-600 В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

**В.В. Головин, А.И. Карпенко, А.М. Тучков**

*Белоярская АЭС, г. Заречный*



В статье показана возможность расчетного моделирования температурных режимов разогрева элементов отработавших сборок реактора БН-600 при их транспортировке в газовой среде. Расчетное моделирование разогрева отработавших сборок в газовой среде с различными значениями мощности их остаточного тепловыделения позволяет обосновывать и оптимизировать безопасные режимы послереакторного обращения с этими сборками.

Мощность остаточного тепловыделения отработавших ТВС активной зоны реактора БН-600 при их выгрузке из реактора обычно не превышает 700 Вт. Однако эксплуатация высокофоновых ТВС с уран-плутониевым топливом приводит к тому, что увеличивается величина остаточного тепловыделения сборок во время выгрузки их из реактора, поэтому может возникнуть необходимость косвенного контроля целостности оболочек ТВЭЛ по температуре при транспортировке отработавших сборок в газовой среде.

В активной зоне реактора БН-600 проводилось облучение двух типов сборок для попутной наработки радионуклида  $\text{Co-60}$ : экспериментальных облучательных устройств (ЭОУ) и опытных стержней компенсации реактивности (ОКС). Величина мощности остаточного тепловыделения выгружаемых из реактора ЭОУ составляет ~2–2,6 кВт, что в три раза больше, чем у ТВС, выгружаемых по штатной схеме. Это обусловлено тем, что выгрузка ЭОУ из реактора производится сразу после окончания облучения без их выдержки в ВРХ. ОКС имеет меньшее значение мощности остаточного тепловыделения по сравнению с ЭОУ, но величина удельного тепловыделения больше на 13%.

Проектная документация на облучательные сборки определяет набор предельных параметров эксплуатации, таких как максимальное время облучения, активность радионуклидов в конце облучения, максимальная повреждающая доза, максимальный флюенс нейтронов и другие. Реальные условия эксплуатации облучательных сборок могут быть отличными от проектных в силу ряда причин, поэтому необходимо учитывать эти отклонения с тем, чтобы обеспечить надежность и безопасность послереакторного обращения с этими сборками.

При выгрузке из реактора отработавшие ТВС, ЭОУ и ОКС (в дальнейшем – отработавшие сборки) перемещаются по транспортно-технологическому тракту (ТТТ), где на некоторых этапах транспортировки могут длительное время (до 1 ч) находиться в газовой среде.

При нахождении отработавших сборок в газовой среде снижается интенсивность теплоотвода от этих сборок и, как следствие этого, возможен значительный

разогрев элементов транспортируемых сборок, что может привести к их разгерметизации. Расчетное моделирование температурных режимов отработавших сборок в газовой среде позволяет оптимизировать условия проведения транспортно-технологических операций с этими сборками.

Описание расчетной модели дается на примере ЭОУ.

По конструкции, габаритам и используемым деталям ЭОУ в максимальной степени унифицировано с ТВС боковой зоны воспроизводства реактора БН-600. Рабочая часть ЭОУ состоит из набора замедляющих, нарабатывающих и поглощающих элементов.

Принципиальная конструкция ЭОУ и его расчетная модель приведены на рис.1.

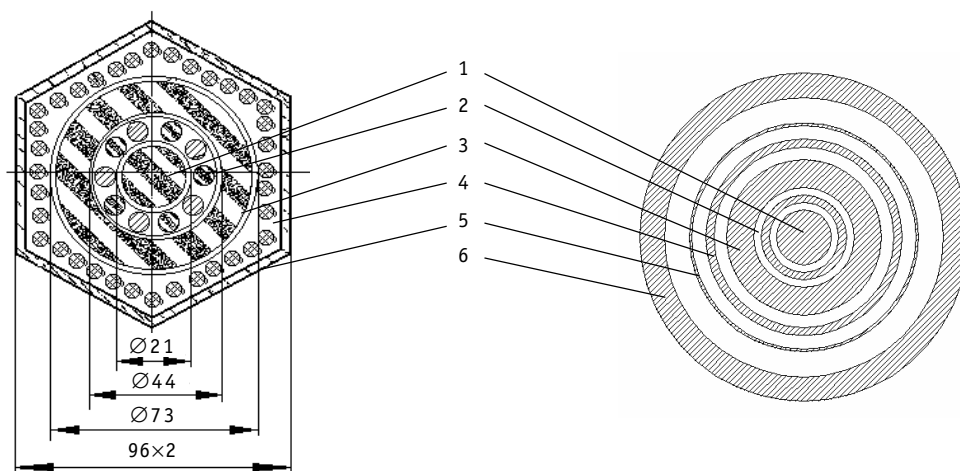


Рис.1. Принципиальная конструкция ЭОУ и расчетная модель ЭОУ: 1 – центральный замедляющий элемент (центральный ЗЭЛ); 2 – внутренние ЗЭЛы в количестве 5 шт. и нарабатывающие элементы (НЭЛы) в количестве 5 шт.; 3 – кольцевой ЗЭЛ двустороннего охлаждения; 4 – поглощающие элементы (ПЭЛы) 36 шт.; 5 – чехол; 6 – труба-рейка механизма передачи пакетов (МПП)

Толщины газовых зазоров между слоями расчетной модели ЭОУ определяются из толщин каждого слоя расчетной модели и средних радиусов этих слоев.

Тепловыделение в каждом расчетном слое определяется как сумма тепловыделений каждого элемента этого слоя.

Расчетные модели ОКС и ТВС также имеют цилиндрическую структуру и переход к ним осуществляется по алгоритму, аналогичному для ЭОУ.

При разработке расчетных моделей разогрева отработавших сборок в газовой среде принимаются следующие допущения:

- рассчитывается температура только наружной поверхности оболочек всех элементов сборок;
- используются величины остаточного тепловыделения отработавших сборок и их элементов, полученные расчетным или экспериментальным путем;
- отработавшая сборка перемещается в передаточном боксе (ПБ) и обмывочном боксе (ОБ), находясь внутри трубы-рейки МПП;
- теплоотдача от наружной поверхности трубы-рейки МПП осуществляется за счет естественной конвекции окружающего газа в большом объеме и лучистого теплообмена с окружающей средой;
- теплообмен между чехлом отработавшей сборки и внутренней поверхностью трубы-рейки МПП происходит за счет лучистого теплообмена между поверхностями и теплопроводности газового зазора с учетом конвективной составляющей;

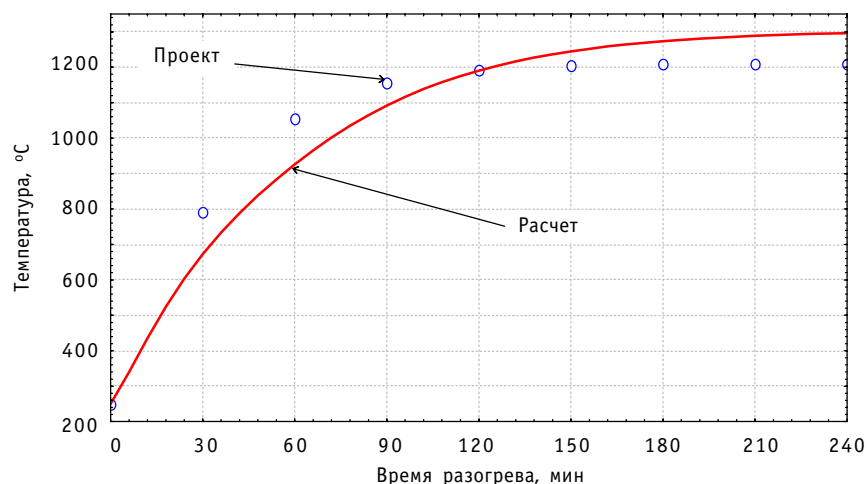


Рис. 2. Результаты расчета разогрева центрального 33Ла 30У в передаточном боксе

- теплообмен между элементами отработавшей сборки происходит за счет лучистого теплообмена между поверхностями и теплопроводности газового зазора с учетом конвективной составляющей;
- при нахождении отработавшей сборки в ГК труба-рейка МПП отсутствует и теплоотдача от наружной поверхности чехла сборки осуществляется за счет естественной конвекции окружающего газа в большом объеме и лучистого теплообмена с окружающей средой;
- температура окружающей газовой среды 30°C;
- начальная температура трубы-рейки МПП в ПБ и ОБ 30°C;
- начальная температура элементов отработавших сборок при разогреве в ПБ 250°C (максимальная температура натрия в реакторе при перегрузке);
- начальная температура элементов отработавших сборок при разогреве в ОБ, после отмывки 150°C (температура пара в гнезде отмывки);
- начальная температура элементов отработавших сборок при разогреве в ГК 100°C (максимальная температура воды в технологической шахте-щели);
- расчет температур проводится для плоскости с максимальным тепловыделением по высоте и без учета отвода тепла через нижний и верхний торцы элементов;
- степень черноты поверхности элементов отработавшей сборки 0,1 до отмывки и 0,35 после отмывки; степень черноты поверхности трубы-рейки МПП 0,8.

Результаты расчетов разогрева ЭОУ и ОКС в газовой среде в сравнении с проектными данными приведены на рис.2 и 3. Результаты расчетов разогрева ТВС в сравнении с проектными данными приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты расчета температуры отработавшей ТВС**

$Q_L$ , Вт/м	Центральный твэл			
	$t_{\text{проект}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{расч}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{отн}}, \%$
50	1000	1175	175	17.5
40	929	1084	155	16.7
30	852	977	125	14.7
20	768	825	57	7.4

$$\Delta t = t_{\text{расч}} - t_{\text{проект}}, ^\circ\text{C}; \Delta t_{\text{отн}} = (\Delta t / t_{\text{проект}}) \times 100\%, \%$$

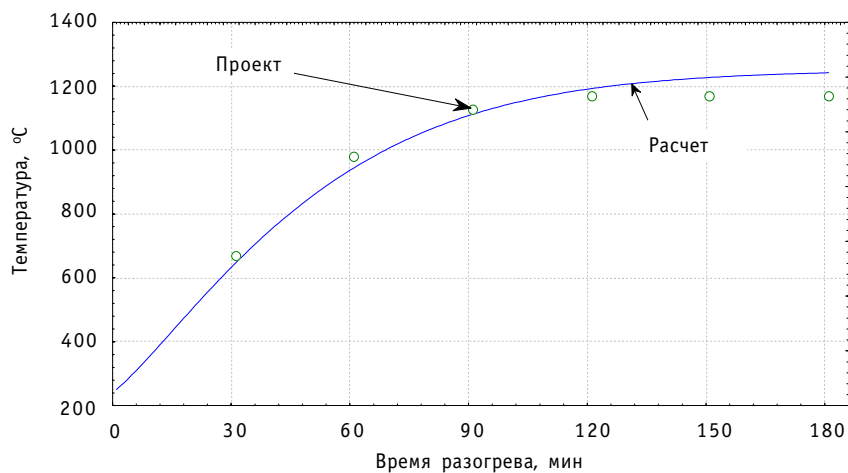


Рис.3. Результаты расчета разогрева центрального ЗЭЛа ОКС в передаточном боксе

На основании выполненных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Разработана программа, позволяющая проводить расчет разогрева элементов ТВС, ЭОУ и ОКС. Программа имеет модульную структуру и позволяет использовать расчетную базу для разработки и подключения новых блоков расчета температурных режимов других типов сборок.

2. Сравнение результатов расчета температурного режима отработавших сборок с проектными данными показало, что максимальное различие расчетных стационарных температур (°C) центральных элементов сборок составляет для ТВС 17,5%; для – ЭОУ 15%; для – ОКС (–3)%.

3. Применение программы вполне приемлемо для проведения оценочных и прогнозных расчетов температурных режимов элементов ТВС, ЭОУ и ОКС в газовой среде.

4. Расчетное моделирование температурных режимов отработавших сборок (как штатных ТВС, так и экспериментальных устройств) с различными значениями мощности их остаточного тепловыделения позволяет обосновывать и оптимизировать безопасные температурные режимы этих сборок при их перегрузке в газовой среде.

Поступила в редакцию 14.02.2005

The method has been developed and the facility manufactured to measure irradiated fuel decay heat directly in the irradiated fuel cooling pond. The important advantage is that the facility has been implemented using the standard equipment and the operations of the irradiated fuel permutation are conducted using the standard means and technologies, thereby providing for the design safety of the work fulfilment. For the first time decay heat of numerous irradiated fuel sub-assemblies of various types has been directly measured.

**УДК 621.039.526**

*Improvement of the Efficiency and the Economics of the Fuel Utilization at the Beloyarsk NPP BN600 Reactor* \ G.V. Babenko, A.V. Gavrilov, V.A. Zhyoltyshev, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 1 table.

Better efficiency and cost advantages of the fuel utilization at the BN600 reactor are offered by increasing fuel burn-up step by step and upgrading the core.

**УДК 621.039.526**

*Irradiation of Experimental MOX Fuel in the BN600 Reactor* \ M.V. Bakanov, G.V. Babenko, V.V. Maltsev, V.F. Roslyakov, B.A. Vasiliev, O.V. Mishin, T.A. Klimashina, M.R. Farakshin; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 3 tables. – References, 3 titles.

The design features of the experimental MOX fuel sub-assemblies, their specific location in the BN600 reactor core, the conditions and the main results of the experimental MOX fuel irradiation in the BN600 reactor are reported.

**УДК 621.039.526**

*The Calculate of Temperature Conditions of the BN-600 Sub-assemblies into Gaseous Medium* \ V.V. Golovin, A.I. Karpenko, A.M. Tuchkov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 1 table, 2 illustrations.

The possibility of estimated modelling of the heat-up temperature conditions of the BN-600 spent sub-assemblies elements during transportation of them into gaseous medium is showed in article. The estimated modelling of the BN-600 spent sub-assemblies heat-up into gaseous medium with different values residual heat release of the spent sub-assemblies permits to substantiate and optimise the safety procedures of post-irradiation handling with that sub-assemblies.

**УДК 532.552**

*Hydrodynamic Instability in the BN600 Power Unit Steam Generators and its Diagnosis* \ P.P. Govorov, A.A. Kuznetsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 4 pages, 2 illustrations.

The article considers the hydrodynamic instability in the once-through steam generators of the BN600 power unit under the transients (startup, shutdown). This process is dangerous because there is a probability of the hydrodynamic instability spread over the entire circuit. This would cause the heating coolant outlet temperature fluctuations and transfer of the temperature perturbations to the primary circuit. Two methods of diagnosing such a process are proposed. On the basis of the covariance analysis method the software which is now under industrial operation has been written for the Beloyarsk NPP data reduction system named Uran.

**УДК 621.039.526**

*Determination of the Allowable Limits of the Steam Superheating Downstream the Evaporators under the Sodium Steam Generator Operating Conditions* \ A.I. Beltyukov, P.P. Govorov, A.I. Karpenko; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations.

The paper summarizes the experimental results of the research into the processes of moisture entrainment from the modular water-sodium steam generator evaporator stages of the BN600 power unit and steam generator operating conditions characterizing by the hydrodynamic instability for various running time accumulated by the evaporator stages. By test the optimum operating ranges of the steam generator operational parameters providing for reliable and safe operation of the steam generator within a given lifetime were determined.

**УДК 532.552**

*Improvement of the BN600 Power Unit Sodium Steam Generator Transients* \ P.P. Govorov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2005. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 9 titles.