

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ ТР-БН ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ БН

И.Д. Фадеев, И.В. Дмитриева, С.Л. Осипов, С.А. Рогожкин

АО «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова», 603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15



Обоснование проектных параметров реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) в режимах нормальной эксплуатации является важной задачей, решение которой необходимо для определения безопасных и оптимальных условий работы. Существующие для этого программы позволяют выполнить расчетный анализ отдельного оборудования (например, парогенератора) или контура циркуляции (второго и третьего). С целью комплексного анализа теплогидравлических параметров разработана программа ТР-БН, предназначенная для определения основных проектных характеристик (температура, расход) по всем теплоотводящим контурам (включая первый) и оптимизации алгоритмов работы РУ БН в режимах нормальной эксплуатации на различных уровнях мощности.

Представлены краткое описание программы и расчетной методики, возможные варианты расчета в зависимости от конструкции парогенератора. Проведена верификация и кроссверификация программы ТР-БН путем сравнения результатов расчета с эксплуатационными данными РУ БН-600 и результатами расчета по программе Корсар/ГП для парогенератора БН-800. Анализ полученных результатов показал удовлетворительное согласие, при этом максимальное относительное отклонение температуры не превышает по натрию 7,5 %, по пару – 14,2 %. Определены среднеквадратичные погрешности параметров рассчитанных по программе ТР-БН, характеризующие точность выполняемых расчетов. Показана возможность использования программы в режимах нормальной эксплуатации при обосновании безопасности РУ БН.

Ключевые слова: верификация, натриевый теплоноситель, парогенератор, погрешность, программа, реакторная установка, нормальная эксплуатация, статические параметры, температура.

ВВЕДЕНИЕ

Для реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (РУ БН) основным режимом работы является стационарный на стопроцентном уровне мощности (базовый режим). Кроме того, есть ряд переходных режимов нормальной эксплуатации, таких как пуск и останов реактора, работа на пониженном уровне мощности при отключенной теплоотводящей петле и т.д.

Существующие программы, такие как Корсар/ГП (АО «ОКБ Гидропресс»), DYNMODVTI

© **И.Д. Фадеев, И.В. Дмитриева, С.Л. Осипов, С.А. Рогожкин, 2016**

(АО «ВТИ»), предназначены для выполнения расчетного анализа данных режимов в третьем контуре совместно со вторым в пределах парогенератора, но провести комплексный анализ основных параметров РУ БН по всем контурам с их помощью невозможно [1].

В связи с этим разработана инженерная расчетная программа ТР-БН [2], позволяющая определять статические параметры РУ БН (температуры и расходы в теплоотводящих петлях) по первому, второму и третьему контурам на различных уровнях мощности является актуальной задачей, решение которой необходимо при обосновании проектных параметров и выполнении многовариантных оптимизационных расчетов режимов нормальной эксплуатации.

Программа также может применяться при уточнении и анализе диапазона возможных отклонений номинальных параметров реакторной установки, связанных с расчетными погрешностями определения характеристик оборудования, при отключении дефектной теплопередающей поверхности в парогенераторе, промежуточном теплообменнике, при возможных отклонениях в системах управления и т.д. Поскольку рассчитанные параметры РУ относятся к данным, используемым для обоснования безопасности реакторных установок в режимах нормальной эксплуатации, программа должна быть верифицирована и аттестована.

В статье представлены результаты верификации программы ТР-БН путем сравнения расчетов с эксплуатационными данными, полученными на РУ БН-600, и с расчетами по программе Корсар/ГП для парогенератора БН-800 [3].

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

Программа ТР-БН предназначена для расчета статических параметров (температур и расходов в теплопередающих контурах) реакторных установок на быстрых нейтронах с трехконтурной схемой (натрий-натрий-вода(пар)) передачи тепла от реактора к турбогенератору в режимах нормальной эксплуатации на различных уровнях мощности.

Моделируется одна петля реакторной установки в предположении симметричной работы теплоотводящих петель.

Программа позволяет проводить расчеты для трех вариантов схемно-конструктивного исполнения прямоточного парогенератора натрий-вода(пар):

- корпусного, совмещающего функции испарителя и основного пароперегревателя;
- секционно-модульного, каждая секция которого состоит из модуля испарителя и модуля основного пароперегревателя;
- секционно-модульного, каждая секция которого состоит из модуля испарителя, модуля основного пароперегревателя и модуля промежуточного пароперегревателя с натриевым перегревом. Основной и промежуточный пароперегреватели по натрию подключены параллельно.

На рисунке 1 представлена расчетная схема с секционно-модульным парогенератором (состоит из модуля испарителя, основного и промежуточного пароперегревателей), которая отвечает наиболее общему варианту. Остальные варианты парогенератора можно рассматривать, с точки зрения расчетной модели, как его частные случаи.

При решении задачи отдельно рассматриваются активная зона, промежуточный теплообменник, основной пароперегреватель, промежуточный пароперегреватель и испаритель. Испаритель разделен на пять участков: подогревательный, поверхностного кипения, пузырькового кипения, ухудшенного теплообмена и перегрева. Активная зона и промежуточный теплообменник рассчитываются по одномерной точечной схеме, парогенератор – по одномерной схеме с разбиением на участки по длине. Движение тепло-

носителей в парогенераторе и промежуточном теплообменнике противоточное.

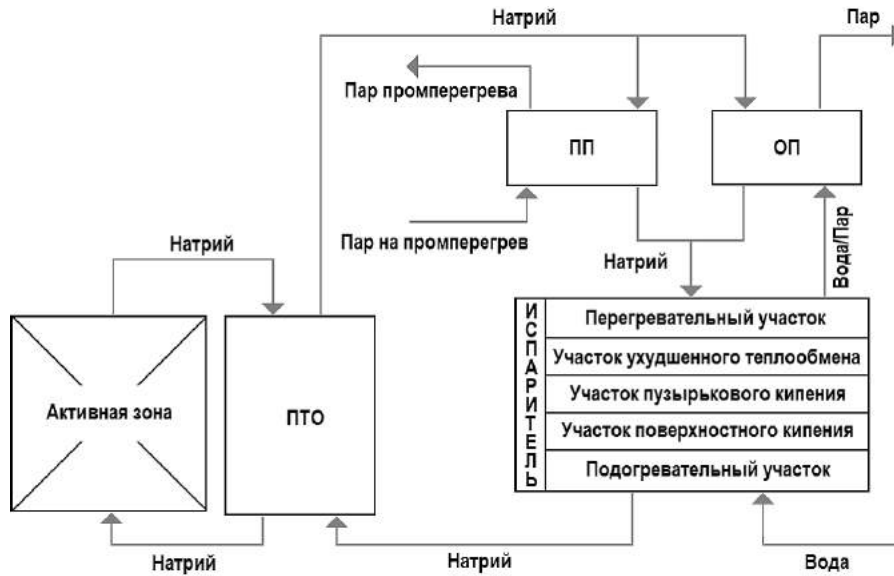


Рис. 1. Расчетная схема РУ: ПТО – промежуточный теплообменник; ПП – промежуточный пароперегреватель; ОП – основной пароперегреватель

Распределение температур по контурам описывается системой уравнений теплового баланса и теплопередачи, которая решается итерационным методом.

Уравнения теплового баланса и теплопередачи для ПГ имеют вид [4]

$$\begin{aligned}
 dQ/dx &= D \cdot di/dx, \\
 dQ/dx &= G_2 \cdot C_p \cdot dT_2/dx, \\
 dQ/dx &= K \cdot \Delta T_{2-3} \cdot dF_{ПГ}/dx,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где Q – мощность реактора, Вт; D – расход питательной воды, кг/с; G_2 – расход теплоносителя второго контура, кг/с; C_p – теплоемкость натрия, Дж/(кг·°С); i – энтальпия воды (пара), Дж/кг; K – поверхностный коэффициент теплопередачи ПГ, Вт/(м²·°С); ΔT_{2-3} – температурный напор ПГ, °С; $F_{ПГ}$ – площадь поверхности теплопередачи в ПГ, м².

Для расчета ПТО используются формулы, применяемые при поперечном расчете противоточного теплообменника: по известным расходам и двум температурам теплоносителей (на входе и (или) выходе) рассчитываются две другие температуры [4].

Исходными данными для расчета являются расходы теплоносителей по первому и второму контурам, температура натрия на выходе из парогенератора (испарителя), температура и давление питательной воды, конструктивные характеристики теплообменного оборудования. В результате расчета определяются температуры натрия первого контура на входе (выходе) активной зоны, второго контура на выходе промежуточного теплообменника (входе в основной и промежуточный пароперегреватель), температура пара на выходе парогенератора (основного и промежуточного пароперегревателя), распределение температур по длине теплопередающей поверхности в парогенераторе.

КРОССВЕРИФИКАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ ПО ПРОГРАММАМ ТР-БН И КОРСАР/ГП

Для проверки основного модуля программы ТР-БН – подпрограммы расчета парогенератора – был выполнен сравнительный анализ результатов расчета режимов

пуска БН-800 с аттестованной программой Корсар/ГП [3].

Программа Корсар/ГП является расчетным кодом улучшенной оценки, и совместно со специально разработанным модулем используется для выполнения расчетных анализов процессов, происходящих в парогенераторах РУ БН в стационарных, переходных и аварийных режимах.

Теплогидравлические данные БН-800 для выполнения расчетов представляют собой набор параметров для стационарных состояний в диапазоне мощности от 25 до 100 % номинальной, в которых реализуется работа испарителя в паровом режиме.

Результаты расчета парогенератора в режиме пуска БН-800 на трех теплоотводящих петлях по программе ТР-БН и Корсар/ГП представлены на рис. 2, 3.

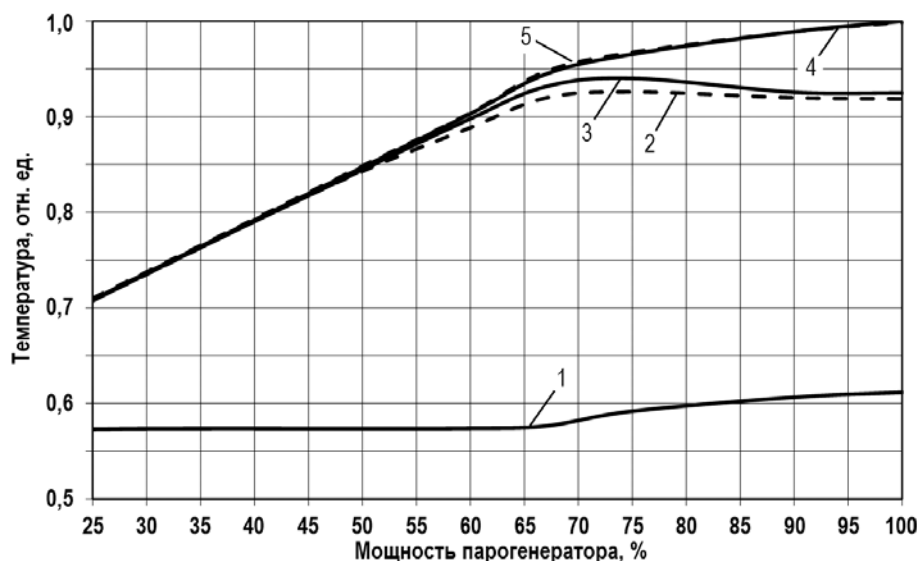


Рис. 2. График зависимости температуры натрия второго контура от мощности при пуске на трех петлях БН-800: 1 – на выходе из парогенератора; 2, 3 – на входе в испаритель, соответственно Корсар/ГП и ТР-БН; 4, 5 – на входе в парогенератор, соответственно ТР-БН и Корсар/ГП

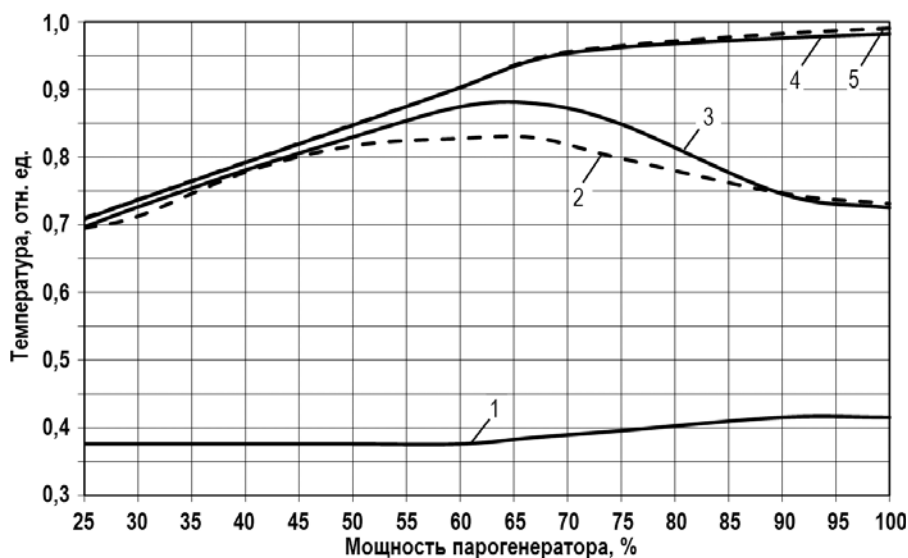


Рис. 3. График зависимости температуры воды (пара) от мощности при пуске на трех петлях БН-800: 1 – на входе в парогенератор; 2, 3 – на выходе из испарителя, соответственно Корсар/ГП и ТР-БН; 4, 5 – на выходе из парогенератора, соответственно ТР-БН и Корсар/ГП

При сравнении результатов расчета по программам абсолютное и относительное отклонения температуры оценивались соответственно по формулам

$$\Delta T = |T_{\text{Корсар/ГП}} - T_{\text{ТР-БН}}|, \quad (2)$$

$$\delta_T = \Delta T / |T_1 - T_2| \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $T_{\text{Корсар/ГП}}$ и $T_{\text{ТР-БН}}$ – рассчитанные температуры среды соответственно по программе Корсар/ГП и ТР-БН; T_1 и T_2 – номинальная температура среды, полученная по программе Корсар/ГП, соответственно на входе и выходе из парогенератора.

Сравнение результатов по программам ТР-БН и Корсар/ГП показало удовлетворительное согласие. Максимальное относительное отклонение температуры по натрию не превышает 4%, по пару – 10% (табл. 1).

Отклонение результатов расчета может быть связано с использованием различных методических подходов в программах, теплофизических свойств и замыкающих соотношений.

Наибольшее расхождение результатов получено по температуре пара на выходе испарителя, и связано с погрешностью расчета коэффициентов теплообмена на испарительном участке в рамках одномерной гомогенной модели. В то же время особенность использованного подхода в программе ТР-БН позволяет добиться меньшего отклонения результатов расчета на входе (выходе) из парогенератора (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительный анализ результатов расчета по ТР-БН и Корсар/ГП

Параметр	Пуск на трёх петлях		Пуск на двух петлях	
	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta_T, \%$	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta_T, \%$
Температура натрия на входе в пароперегреватель	1,4	0,7	1,3	0,7
Температура натрия на входе в испаритель	7,2	3,7	6,3	3,2
Температура пара на выходе из пароперегревателя	4,1	1,4	3,4	1,1
Температура пара на выходе испарителя	25,7	8,8	29,6	9,7

ВЕРИФИКАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ БН-600

Эксплуатационные данные по распределению расходов и температур в контурах получены на действующей реакторной установке БН-600, в которой передача тепла от реактора к турбогенераторам производится по трехконтурной схеме.

Для измерения параметров БН-600 используются система технологического контроля и информационно-измерительная и вычислительная системы поддержки оператора [5].

Для верификации программы ТР-БН по результатам исследования теплогидравлических процессов в режимах нормальной эксплуатации установки БН-600 были выбраны режимы

- пуск и вывод на максимально допустимый по состоянию оборудования уровень мощности на трех петлях из «холодного» состояния;
- плановый останов после работы на заданном уровне мощности на трех петлях.

Результаты расчета режима пуска РУ БН-600 из «холодного» состояния на трех теплоотводящих петлях по программе ТР-БН (сплошные кривые) в сравнении с

эксплуатационными данными показаны на рис. 4 – 7.

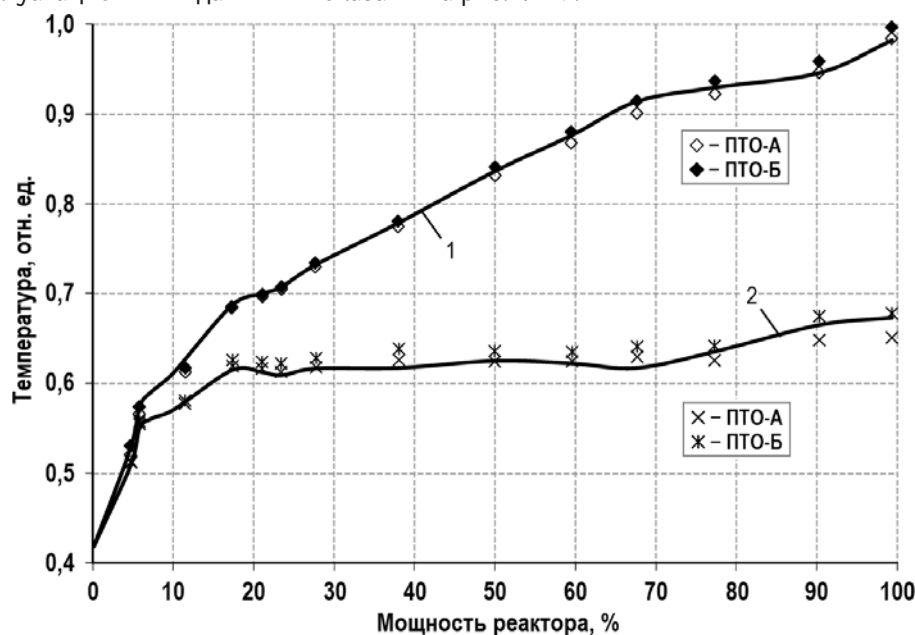


Рис. 4. Температура натрия первого контура в зависимости от мощности РУ: 1 – расчет на входе в ПТО и эксплуатационные данные; 2 – расчет на выходе из ПТО и эксплуатационные данные

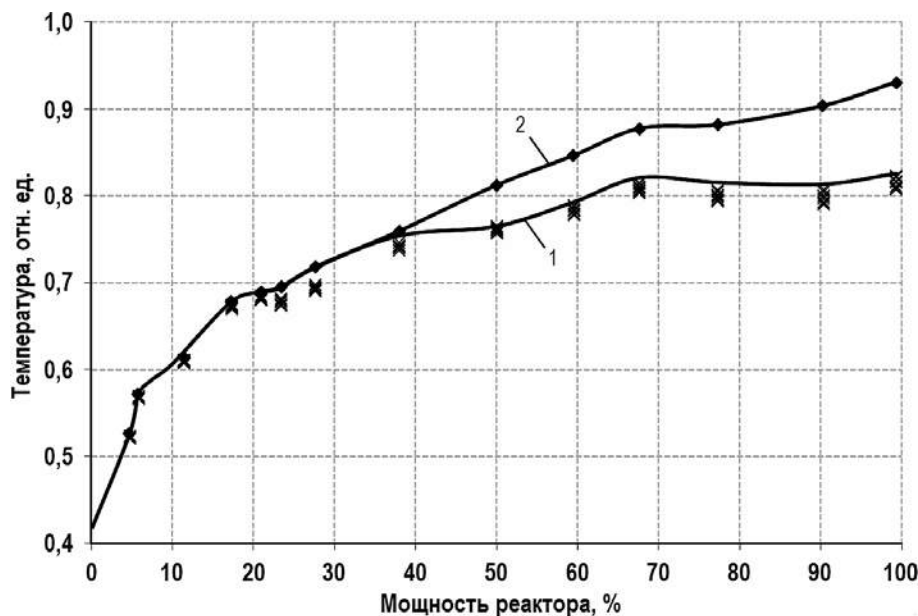


Рис. 5. Температура натрия второго контура в зависимости от мощности РУ: 1– расчет на входе в секции испарителя и эксплуатационные данные; 2 – расчет на входе в парогенератор и эксплуатационные данные

Сравнение результатов расчета по программе ТР-БН и эксплуатационных данных показало удовлетворительное совпадение. Относительные отклонения оценивались по формулам

$$\delta_T = |T_{\text{эксп.}} - T_{\text{ТР-БН}}| / |T_1 - T_2| \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $T_{\text{эксп.}}$ и $T_{\text{ТР-БН}}$ – температуры среды, полученные из эксплуатационных данных и расчета по программе ТР-БН, °С; T_1 и T_2 – номинальные температуры среды, полу-

ченные из эксплуатационных данных соответственно на входе и выходе из теплообменного оборудования, °С;

$$\delta_T = |D_{\text{эксп.}} - D_{\text{ТР-БН}}| / |D_{\text{ном.}}| \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $D_{\text{эксп.}}$ и $D_{\text{ТР-БН}}$ – секционные расходы питательной воды, полученные из эксплуатационных данных и расчета по программе ТР-БН, кг/с; $D_{\text{ном.}}$ – среднее значение номинального эксплуатационного расхода питательной воды по секциям, кг/с.

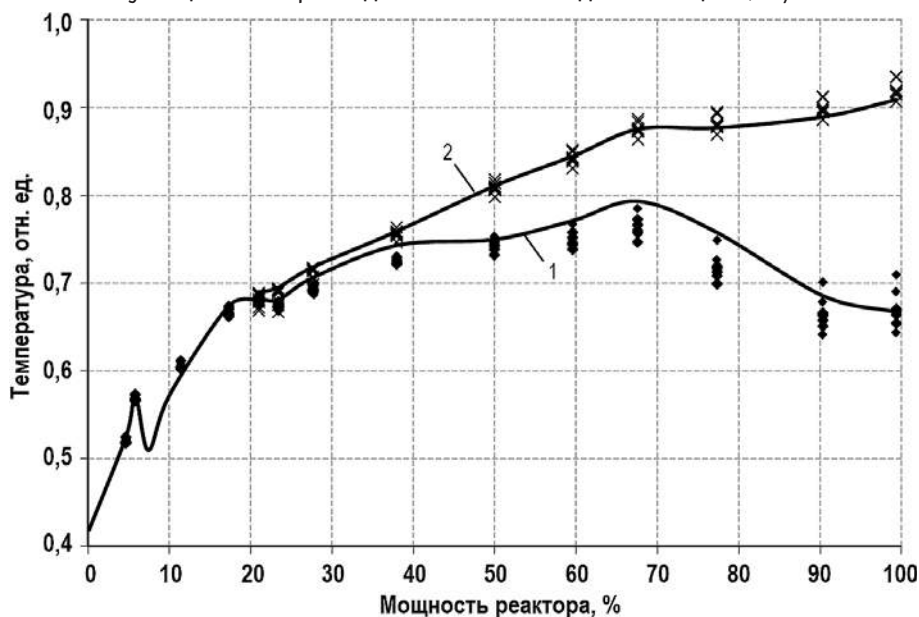


Рис. 6. Температура воды (пара) в зависимости от мощности РУ: 1 – расчет на выходе из секций испарителя и эксплуатационные данные; 2 – расчет на выходе из секций основного пароперегревателя и эксплуатационные данные

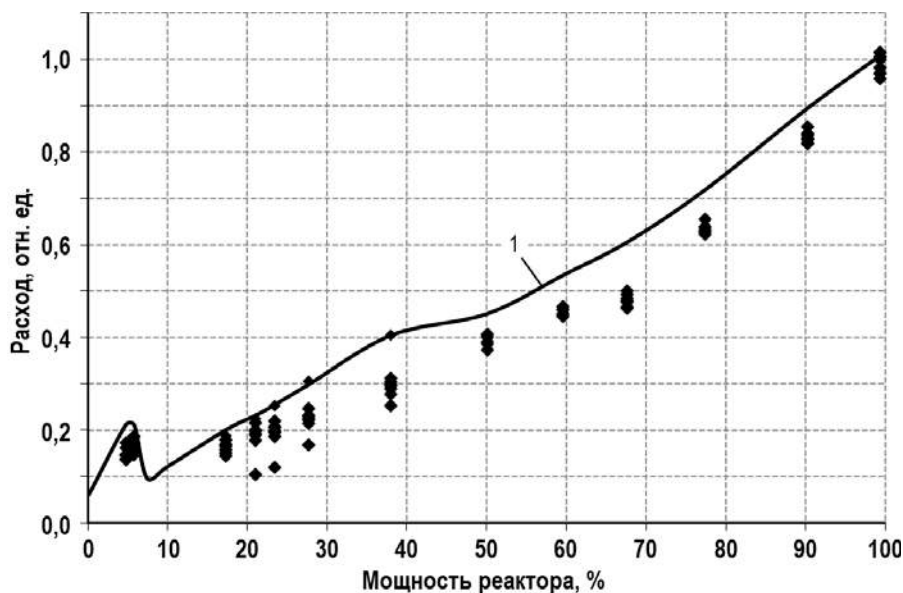


Рис. 7. Расход питательной воды в зависимости от мощности РУ, полученный в результате расчета (1) и из эксплуатационных данных

Аналогично был выполнен сравнительный анализ для режима планового останова РУ БН-600 на трех теплоотводящих петлях, который также показал удовлетво-

рительное совпадение результатов расчета с эксплуатационными данными.

Максимальные относительные отклонения температуры для обоих режимов не превышают по натрию 7,5 %, по пару – 14,2 %, относительное отклонение по расходу питательной воды – 15,2 % (табл. 2).

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов расчета по ТР-БН и эксплуатационных данных БН-600

Параметр	Пуск на трёх петлях	Останов на трёх петлях
	δ_t , %	δ_t , %
Температура натрия первого контура	7,5	7,4
Температура натрия второго контура	4,2	6,9
Температура пара на выходе испарителя	11,9	14,2
Температура пара на выходе основного пароперегревателя	6,1	5,7
Температура пара на выходе промежуточного пароперегревателя	4,5	5,3
Расход питательной воды	15,2	15,1

Таблица 3

Погрешность расчета по программе ТР-БН

Параметр	Погрешность расчёта, %
Температура пара на выходе из испарителя	± 15
Температура натрия на входе в испаритель	± 10
Температура натрия на входе в парогенератор	± 4
Температура воды (пара) на выходе из парогенератора	± 8
Температура натрия первого контура на входе в промежуточный теплообменник	± 8
Температура натрия первого контура на выходе из промежуточного теплообменника	± 11
Расход питательной воды	± 16

Расхождение результатов расчета и эксплуатационных данных при определении расхода питательной воды для обоих режимов может быть обусловлено его неравномерным распределением между секциями парогенератора (в программе используется посекционный расход питательной воды в предположении равенства расходов), погрешностью расходомера и погрешностью определения мощности реакторной установки. Наибольшее отклонение результатов расчета температуры от экспериментальных данных получено для пара на выходе из испарителя. Стоит отметить, что основными при оптимизации алгоритмов работы РУ являются параметры на входе и выходе из теплообменного оборудования. Температуры на промежуточных участках (в частности, температура пара на выходе из испарителя) используются для оценки состояния оборудования и могут уточняться по специализированным программам.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОГРАММЫ

Погрешности расчета программы ТР-БН определялись по методике, представленной в [6, 7].

Суммарное среднее квадратичное отклонение рассчитывается по формуле

$$S_{\Sigma} = (S_{\text{изм.}}^2 - S^2)^{1/2}, \quad (6)$$

где $S_{\text{изм.}} = (S_{\theta}^2 + S_x^2)^{1/2}$ – среднее квадратичное отклонение измеряемой величины; S_{θ} , S_x – средние квадратичные отклонения систематической и случайной погрешностей измерения соответственно; $S = [\sum_i (x_{\text{расч.}} - x_i)^2 / (n - 1)]^{1/2}$ – среднее квадратичное отклонение группы, содержащей n результатов измерений x_i относительно расчетной величины $x_{\text{расч.}}$.

Доверительная граница погрешности расчета $\Delta = K \cdot S_{\Sigma}$, где K – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью 0,99.

Оценка погрешности, представленная в табл. 3, выражена в относительной форме (по отношению к среднему значению секционного расхода питательной воды или перепаду температуры между входом и выходом соответствующего оборудования, полученным из экспериментальных данных $X_{\text{эксп.}}^{\text{ср}}$): $\delta = \Delta / X_{\text{эксп.}}^{\text{ср}} \cdot 100\%$.

Относительные отклонения программы ТР-БН, полученные в результате кроссверификационных расчетов и сравнения с эксплуатационными данными БН-600, попадают в область погрешностей программы, определяемых по представленной методике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана программа ТР-БН, позволяющая оперативно определить температуры и расходы в теплоотводящих петлях РУ БН для режимов нормальной эксплуатации на различных уровнях мощности. Выполненные верификационные расчеты режимов пуска и останова БН-600, 800 по программе ТР-БН показали удовлетворительное согласие результатов расчета с программой Корсар/ГП и эксплуатационными данными БН-600.

Погрешности программы ТР-БН, полученные по специальной методике, охватывают область указанных отклонений и определяют точность выполняемых расчетов.

Выполненные верификация и кроссверификация позволяют использовать программу для определения проектных параметров и оптимизации алгоритмов работы РУ БН для обоснования безопасности в режимах нормальной эксплуатации.

Литература

1. *Фадеев И.Д., Воронцов В.Е., Дмитриева И.В., Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф.* Расчетные исследования в обоснование параметров реакторной установки БН-800 в режимах нормальной эксплуатации // Вопросы атомной науки и техники. – 2015. – Вып. 1. – С. 22-27.
2. *Дмитриева И.В., Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Фадеев И.Д.* Разработка программы «ТР-БН» для расчета статических параметров РУ БН / Сборник докладов научно-технической конференции «Теплофизика-2012», Обнинск, 2013. С. 532-540.
3. *Лосевской Г.В., Смирнов М.В.* Применение кода Корсар/ГП для расчета парогенераторов с натриевым теплоносителем / Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции «Теплофизика-2011», Обнинск, 2011. С. 61-63.
4. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977.
5. *Фадеев И.Д., Дмитриева И.В., Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф.* Верификация программы «ТР-БН» на базе эксплуатационных данных реактора БН-600 / Сборник докладов научно-технической конференции «Теплофизика-2013», Обнинск, 2014. С. 444-452.
6. РТМ 1604.062-90. Руководящий технический материал. Рекомендации, правила, методики расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования ядерных энергетических установок. Часть 1. – Обнинск: ФЭИ, 1990.
7. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013.

Поступила в редакцию 01.02.2016 г.

Авторы

Фадеев Илья Дмитриевич, инженер-конструктор

E-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

Дмитриева Ирина Васильевна, ведущий инженер-конструктор, канд. техн. наук

Осипов Сергей Леонидович, начальник подразделения, канд. техн. наук

Рогожкин Сергей Александрович, заместитель начальника подразделения

E-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

UDC 621.039.513:621.039.526

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF THE TR-BN PROGRAM FOR VALIDATION OF THE NORMAL OPERATION MODES IN THE BN REACTORS

Fadeev I.D., Dmitrieva I.V., Osipov S.L., Rogozhkin S.A.

JSC "Afrikantov OKB Mechanical Engineering"

15 Burnakovskiy proezd, Nizhny Novgorod, 603074 Russia

ABSTRACT

Validation of design parameters for the BN sodium cooled fast reactor plants in the normal operation modes is an important task that has to be solved to determine the safe and optimal operation conditions. Programs existing for this purpose enable computational analyses of individual equipment (for example, a steam generator) or a circulation circuit (secondary and third circuits). In order to accomplish the integrated analysis of the thermal-hydraulic parameters, the TR-BN program has been developed that is intended to define the main design characteristics (temperature, flow rate) for all heat transfer circuits (including the primary circuit) and to optimize the operation algorithms for the BN reactor plants in the normal operation modes at various power levels.

Presented is a brief description of the program, calculational procedure and possible analysis options depending on the steam generator design. The TR-BN program has been verified and cross-verified through comparing the calculated results with operational data from the BN-600 reactor plant and with the results calculated by the Korsar/GP program for the steam generator of the BN-800 reactor. The analysis of the obtained results has shown satisfactory agreement — the maximum relative deviation of the temperature is below 7.5% for sodium; and 14.2 %, for steam. For the parameters calculated by TR-BN, the root-mean-square errors have been defined that characterize the accuracy of the accomplished calculations. It has been shown that the TR-BN program can be used to validate safety of the BN reactor plants in the normal operation modes.

Key words: verification, sodium coolant, steam generator, error, program, reactor plant, normal operation, static parameters, temperature.

REFERENCES

1. Fadeev I.D., Vorontsov V.E., Dmitrieva I.V., Osipov S.L., Rogozhkin S.A., Shepelev S.F. Raschetnye issledovaniya v obosnovanie parametrov reaktornoj ustanovki BN-800 v rezhimah normal'noj ekspluatatsii [The calculation research to validate BN-800 reactor plant parameters in normal operation modes]. Voprosy Atomnoi Nauki i Tehniki, 2015, v. 1, pp. 22-27 (in Russian).

2. Dmitrieva I.V., Osipov S.L., Rogozhkin S.A., Fadeev I.D. Razrabotka programmy «TR-BN» dlya rascheta staticheskikh parametrov RU BN. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii «Teplofizika-2012», Obninsk, 2013, pp. 532-540 (in Russian).
3. Losevskoj G.V., Smirnov M.V. Primenenie koda Korsar/GP dlya rascheta parogeneratorov s natrievym teplonositelem. Sbornik tezisov dokladov na nauchno-tehnicheskoy konferencii «Teplofizika-2011», Obninsk, 2011, pp. 61-63 (in Russian).
4. Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovy teploperedachi. Moscow, Energy Publ., 1977 (in Russian).
5. Fadeev I.D., Dmitrieva I.V., Osipov S.L., Rogozhkin S.A., Shepelev S.F. Verifikaciya programmy «TR-BN» na baze ekspluatacionnyh dannyh reaktora BN-600. Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii «Teplofizika-2013», Obninsk, 2014, pp. 444-452 (in Russian).
6. RTM 1604.062-90. Rukovodyaschij tehniceskij material. Rekomendacii, pravila, metodiki rascheta gidrodinamicheskikh i teplovyh harakteristik elementov i oborudovaniya yadernyh energeticheskikh ustanovok. Part 1, Obninsk, FEI Publ., 1990 (in Russian).
7. GOST R 8.736-2011 Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenij. Osnovnye polozheniya. Moscow. Standartinform Publ., 2013 (in Russian).

Authors

Fadeev Il'ya Dmitrievich, Design Engineer

E-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

Dmitrieva Irina Vasil'evna, Lead Design Engineer, Cand. Sci. (Engineering)

Osipov Sergey Leonidovich, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

Rogozhkin Sergey Aleksandrovich, Deputy Head of Department

E-mail: birbraer@okbm.nnov.ru