

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ИНЦИДЕНТА С БОЛЬШОЙ ТЕЧЬЮ ВОДЫ В НАТРИЙ В ПАРОГЕНЕРАТОРЕ РУ БН-600

*Перевозников С.В., Михин С.А., Камаев А.А., Пазин Г.Н., Мирзеабасов О.А.,
Мяздрикова О.И., Борисов В.В., Пахомов И.А.*

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,
249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1



Приводятся результаты сравнения расчетных данных с показаниями приборов контроля течи воды в натрий и гидродинамических параметров во втором натриевом контуре, наблюдавшихся во время инцидента с течью воды в натрий в модуле основного пароперегревателя (ОП) РУ БН-600 19 января 1982 г.

Расчеты выполнялись с помощью двух кодов, предназначенных для анализа эффективности системы контроля межконтурной неплотности парогенератора при малых течах (SLEAK) и системы защиты парогенератора и второго контура от превышения давления при больших течах (LLEAK-3С 1.0). Использование двух расчетных кодов позволило смоделировать работу системы защиты парогенератора БН-600 при течи в парогенераторе с учетом ее эволюции.

Результаты расчетного моделирования реального инцидента на РУ БН-600 подтверждают адекватность физико-математических моделей, реализованных в кодах SLEAK и LLEAK-3С 1.0.

Ключевые слова: натриевый теплоноситель, парогенератор натрий-вода, система защиты парогенератора, течи воды в натрий, система контроля малых течей, больших течей.

Для цитирования: *Перевозников С.В., Михин С.А., Камаев А.А., Пазин Г.Н., Мирзеабасов О.А., Мяздрикова О.И., Борисов В.В., Пахомов И.А.* Расчетный анализ инцидента с большой течью воды в натрий в парогенераторе РУ БН-600 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.08>

ВВЕДЕНИЕ

В статье приводятся результаты сравнения расчетных данных с показаниями приборов контроля течи воды в натрий и гидродинамических параметров во втором натриевом контуре, наблюдавшихся во время инцидента с течью воды в натрий в модуле основного пароперегревателя (ОП) РУ БН-600 19 января 1982 г. [1].

© *Перевозников С.В., Михин С.А., Камаев А.А., Пазин Г.Н., Мирзеабасов О.А.,
Мяздрикова О.И., Борисов В.В., Пахомов И.А., 2024*

Необходимо отметить, что реконструкция событий в [1] выполнена на основании данных послеаварийного анализа. Данные представлены довольно дискретно и не описывают достаточно точно происходящие процессы. Тем не менее, эта реконструкция может быть использована для сравнительного анализа.

Расчеты выполнялись с помощью двух кодов, предназначенных для анализа эффективности системы контроля межконтурной неплотности парогенератора при малых течах и системы защиты парогенератора и второго контура от превышения давления при больших течах. Использование двух расчетных кодов позволило смоделировать работу системы защиты парогенератора БН-600 при течи в парогенераторе с учетом ее эволюции из малой в большую.

С помощью кода SLEAK [2] рассчитывались показания следующих приборов контроля малых течей в парогенераторе БН-600: ИВА-1 (индикатор водорода автоматический) – контроль растворенного водорода в натрии; КАВ-7 (кондуктометрический анализатор водорода) – контроль газообразного водорода в защитном газе ББН (бак буферный натриевый); ИТИ (индикатор течи индуктивный) и ИШИТ (индуктивно-шумовой индикатор течи) – контроль пузырьков газа в натрии.

С помощью кода LLEAK-3С 1.0 [3] были рассчитаны параметры второго контура при большой течи в парогенераторе РУ БН-600: давление в защитном газе ББН, расходы натрия на выходе из каждой секции парогенератора и ряд других параметров.

ПАРОГЕНЕРАТОР АЭС БН-600 И СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ПРИ ТЕЧИ ВОДЫ В НАТРИЙ

На БН-600 реализована секционно-модульная схема парогенератора натрий-вода. Парогенератор (ПГ) состоит из восьми параллельных секций. Каждая секция состоит из трех модулей: испарителя (ИС), основного пароперегревателя (ОП) и промежуточного пароперегревателя (ПП), а также трубопроводов обвязки по натрию, пару и воде. Отсечная арматура предусмотрена на входном и выходном натриевых и пароводяных трубопроводах каждой секции ПГ для того, чтобы при необходимости изолировать вышедшую из строя секцию от остальных и продолжать работать на оставшихся.

Схема второго натриевого контура БН-600 представлена на рис. 1.

Расположение всех датчиков контроля течи воды в натрий и устройств защиты от превышения давления приведено на рис. 2.

Для защиты от превышения допустимого давления на ББН установлены два устройства с разрывными мембранами (РМ).

Для контроля большой течи используются датчики

- давления в защитном газе ББН;
- расходомеров, установленных на выходе из каждой секции парогенератора.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ИНЦИДЕНТА С ТЕЧЬЮ ВОДЫ В НАТРИЙ В МОДУЛЕ ОСНОВНОГО ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ (ОП) РУ БН-600 19 ЯНВАРЯ 1982 г.

При описании инцидента с течью воды в натрий использованы материалы, представленные в [1].

Разгерметизация теплообменной поверхности парогенераторов РУ БН-600 происходила, в основном, в первые годы эксплуатации установки (1980–1985 гг.). Описываемый

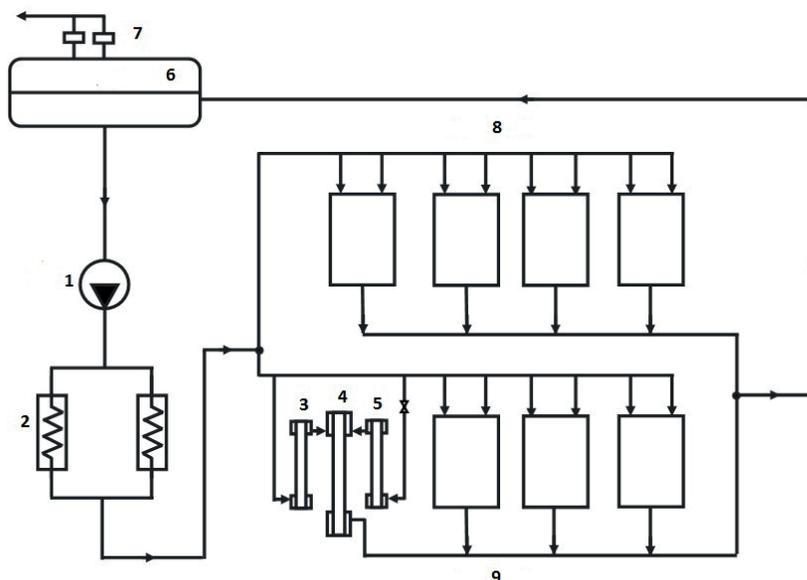


Рис. 1. Схема второго натриевого контура БН-600: 1 – главный циркуляционный насос второго контура (ГЦН-2); 2 – промежуточный теплообменник (ПТО); 3 – модуль основного пароперегревателя (ОП); 4 – модуль испарителя (ИС); 5 – модуль промежуточного пароперегревателя (ПП); 6 – бак буферный натриевый (ББН); 7 – разрывная мембрана (РМ); 8 – сторона А парогенератора; 9 – сторона Б парогенератора

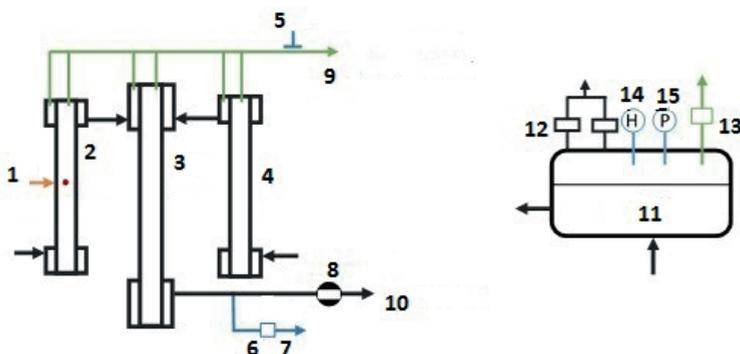


Рис. 2. Расположение приборов контроля течи воды в натрий и устройств защиты от превышения давления во втором контуре: 1 – место течи; 2 – модуль основного пароперегревателя (ОП); 3 – модуль испарителя (ИС); 4 – модуль промежуточного пароперегревателя (ПП); 5 – индикатор течи индуктивный (ИТИ); 6 – индуктивно-шумовой индикатор течи (ИШИТ); 7 – индикатор водорода автоматический (ИВА-1); 8 – расходомер; 9 – коллектор сдувок; 10 – коллектор натриевый; 11 – бак буферный натриевый (ББН); 12 – разрывная мембрана (РМ); 13 – кондуктометрический анализатор водорода (КАВ-7); 14 – датчик уровня натрия в ББН (Н); 15 – датчик давления в газе ББН (Р)

инцидент произошел 19 января 1982 г.

К моменту появления течи работа энергоблока была стабильной, работали все три контура, мощность установки составляла 93,6%. Расход натрия по второму контуру петли № 5 составлял 1920 кг/с.

Характеристики парогенератора № 5 к моменту начала течи воды в натрий:

- температура натрия на входе ПГ 492°C;

БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

- температура натрия на выходе ПГ 298°С;
- давление защитного газа в ББН 0,14 – 0,15 МПа (изб.);
- давление свежего пара 11,2 МПа;
- температура свежего пара 489°С.

Все приборы контроля течи воды в натрий были исправны и находились в рабочем состоянии. Модуль промежуточного пароперегревателя (ПП) секции 5Б1 парогенератора был отключен.

Хронология развития инцидента, полученная на основании оперативных данных и с учетом результатов послеаварийного анализа, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Хронология развития инцидента на РУ БН-600 19 января 1982 г.

| Время, ч:м:с | Событие | Действия персонала | Послеаварийный анализ | |
|--------------|---|----------------------------|---|--|
| 16:10 | | | Начало течи воды в натрий в модуле ОП секции 5Б1 (расход пара 1–1,7 г/с) Снижение расхода натрия на выходе из секции 5Б1 на 2% | |
| 16:11 | Рост показаний ИВА-5Б1 | Проверка состояния ИВА-5Б1 | | |
| 16:12 | | | Срабатывание ИТИ-5Б1 | |
| 16:13 | Показания ИВА-5Б1 – 0,22 ppm | | | |
| 16:15 | Резкий рост показаний всех ИВА 5ПГ | | | |
| 16:20 | | | Срабатывание ИТИ-5Б1 | Увеличение расхода пара до 8,3 г/с Уменьшение расхода натрия на выходе из секции 5Б1 на 8–16,5 % Рост расхода натрия через другие секции 5ПГ на 3% |
| 16:23 | Срабатывание ИШИТ-5Б1 Рост давления в ББН | | | Резкий рост расхода пара до 250 г/с Рост расхода натрия на выходе из секции 5Б1 на 35% Рост расхода натрия через другие секции 5ПГ на 10% |
| 16:23:30 | | | Срабатывание разрывной мембраны при давлении 0,18 МПа (изб.) | |
| 16:24 | | Начало отключения 5ПГ | | |
| 16:30 | Показания КАВ-7 вышли на максимум (5% об.) | | | |
| 16:32 | Показания ИВА-5Б1 – 8,7 ppm Показания ИВА 5ПГ – (3–5) ppm Срабатывание ИШИТ-5Б1 | | По сообщению оператора показания ИВА-5Б1 достигали 30 ppm | |

По результатам послеаварийного анализа была выполнена оценка количества воды, попавшей во второй натриевый контур – 20,3 кг. Также было определено количество теплообменных трубок ПГ со сквозными дефектами – 7 шт.

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЦИДЕНТА С ПОМОЩЬЮ КОДОВ SLEAK И LLEAK-3C 1.0

Расчеты выполнялись с помощью двух кодов – SLEAK и LLEAK-3C 1.0. Использование двух расчетных кодов позволило смоделировать работу системы защиты парогенератора БН-600 при течи в парогенераторе с учетом ее эволюции.

Расчетный код SLEAK [2] предназначен для анализа эффективности подсистемы контроля «малых» течей воды в натрий системы защиты парогенератора. Код основан на решении дифференциальных уравнений баланса продуктов реакции натрия с водой. Константы скорости реакции газообразного водорода с натрием получены экспериментально и приведены в [4, 5].

Развитие малой течи во время инцидента с расходом воды происходило в течение 13-ти минут. На рисунке 3 показаны сценарии изменения расхода воды, принятый для расчета кодом SLEAK, и полученные концентрации водорода в натрии на выходе из аварийной и неаварийной секций при малой течи.

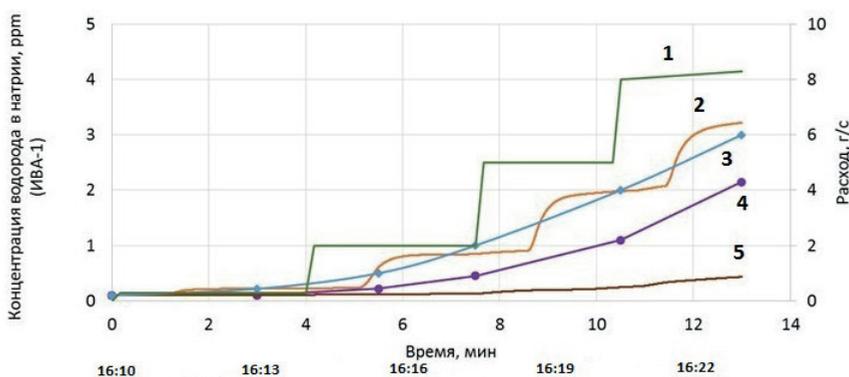


Рис. 3. Расход воды и концентрации водорода в натрии на выходе из аварийной и неаварийной секций при малой течи: 1 – расход воды; 2 – показания ИВА-1 на выходе из аварийной секции (расчет); 3 – показания ИВА-1 на выходе из аварийной секции (анализ); 4 – показания ИВА-1 на выходе из неаварийной секции (анализ); 5 – показания ИВА-1 на выходе из неаварийной секции (расчет)

0 минут расчетного времени соответствуют 16 ч. 10 м. реального времени. Развитие малой течи происходит немонотонно, расход воды увеличивается скачкообразно по мере сквозного повреждения соседних трубок. Результаты расчета соответствуют показаниям ИВА-1 на аварийной секции.

Также с помощью кода SLEAK были получены значения объемного содержания газообразного водорода в натрии на выходе из аварийной секции (ИШИТ) и в защитном газе ББН (КАВ-7). Рассчитанные показания приборов ИШИТ и КАВ-7 в целом соответствуют данным послеаварийного анализа, их сравнение приведено на рис. 4. Из [1] известно, что ИШИТ на аварийной секции сработал на 13-ой минуте с начала течи. По расчетным данным объемное содержание водорода превысило аварийную уставку в 5% через 12 минут.

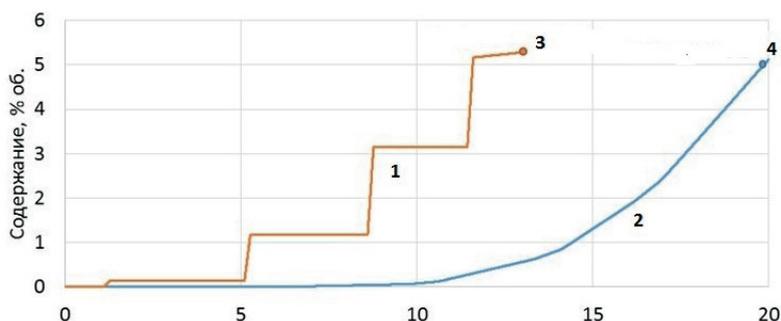


Рис. 4. Показания приборов ИШИТ и КАВ-7: 1 – показания ИШИТ (расчет); 2 – показания КАВ-7 (расчет); 3 – срабатывание ИШИТ (анализ); 4 – показания КАВ-7 (анализ)

Показания прибора КАВ-7, установленного на ББН, достигли 5% об. к 20-ой минуте с начала течи (по расчету – 19 минут 12 секунд). Запаздывание роста показаний КАВ-7 связано с большим временем доставки пробы газа до прибора.

В 16 ч 23 мин, через 13 минут после начала течи произошло резкое увеличение расхода воды до 250 г/с (по данным послеаварийного анализа), что привело к быстрому образованию пузыря водорода в модуле и выталкиванию натрия в коллекторы. Расход натрия на выходе из аварийной секции увеличился в 1,35 раза, уровень натрия в ББН увеличился на 250 мм. Одна из разрывных мембран, установленных на ББН, сработала при значении давления 0,18 МПа (изб.) в 16 ч 23 мин 30 с. В 16 ч 24 мин оператором был запущен автоматический алгоритм «большая течь» и началось отключение аварийного ПГ.

Расчет гидродинамических параметров второго контура БН-600 при большой течи выполнен кодом LLEAK-3С 1.0 [3]. Код предназначен для анализа эффективности систем защиты парогенератора и второго натриевого контура от превышения давления. Процессы, протекающие в натриевом циркуляционном контуре при возникновении течи воды, описаны в рамках одномерной, равных давлений, односкоростной физико-математической модели термически неравновесного трехкомпонентного газожидкостного потока (натрий, водород, гидроксид натрия). Рассчитываются гидродинамические параметры второго натриевого контура, такие как давление и расход всех компонентов. Более подробное описание кода приведено в [6].

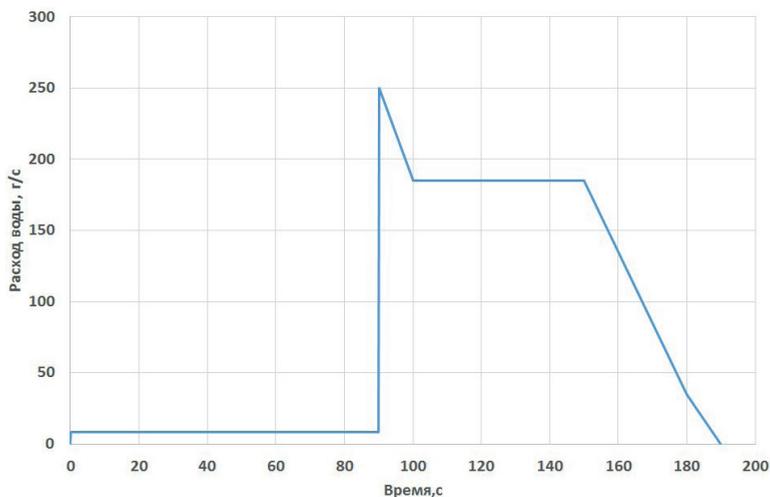


Рис. 5. Расход воды (пара) в натрий второго контура

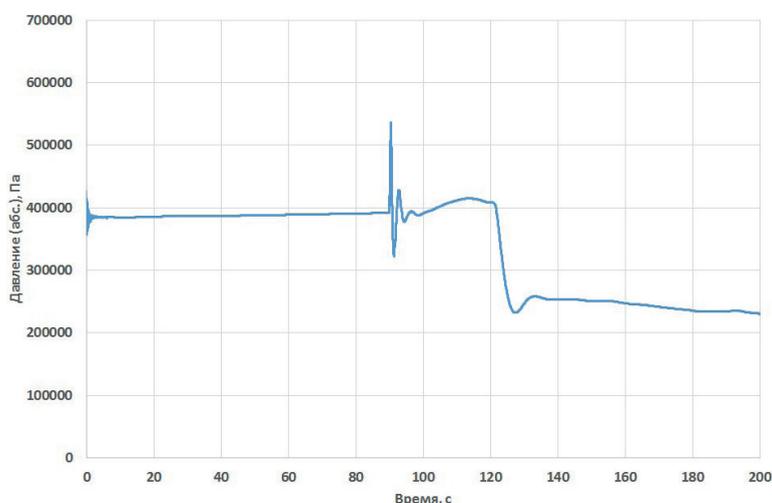


Рис. 6. Давление в месте течи (расчет)

Сценарий истечения воды во второй контур, принятый в расчете, представлен на рис. 5. При этом общая масса воды, попавшей во второй контур с начала большой течи, соответствует послеаварийному анализу – 14,9 кг. 90-я секунда расчетного времени соответствует 16 ч. 23 м. реального времени.

На рисунке 6 представлено расчетное значение давления в месте течи воды в натрий. Резкое увеличение расхода воды на 90-ой секунде расчетного времени приводит к кратковременному всплеску давления в зоне химического взаимодействия реагентов. Затем рост давления продолжается до момента срабатывания разрывной мембраны на БН, после чего давление во втором контуре снижается.

На рисунках 7 – 9 представлено сравнение расчетных данных и показаний приборов контроля течи воды в натрий (данные послеаварийного анализа [1]).

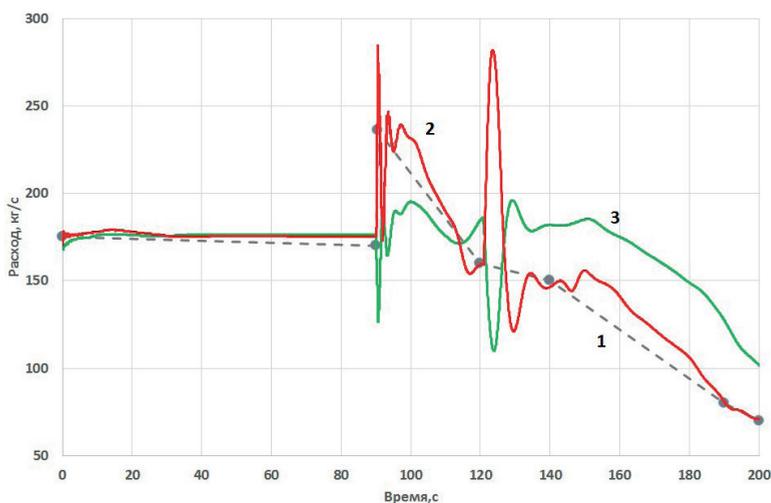


Рис. 7. Расход натрия на входе и выходе из аварийной секции ПГ: 1 – расход натрия на выходе из аварийной секции ПГ (анализ); 2 – расход натрия на выходе из аварийной секции ПГ (расчет); 3 – расход натрия на входе в аварийную секцию ПГ (расчет)

Очень хорошее совпадение результатов расчета с данными послеаварийного анализа получено по времени срабатывания РМ. Это подтверждает правильность выбора сценария изменения расхода воды в натрий при возникновении большой течи. Достаточно хорошие результаты получены для уровня натрия в БН и для величины расходов натрия на выходе из аварийной и неаварийных секций ПГ.

В целом полученные с помощью кода LLEAK-3С 1.0 гидродинамические параметры достоверно описывают процессы во втором контуре БН-600 при большой течи воды в натрий и не противоречат данным послеаварийного анализа инцидента.

Результаты расчетов приведены в таблице 2. Там же приведены данные послеаварийного анализа.

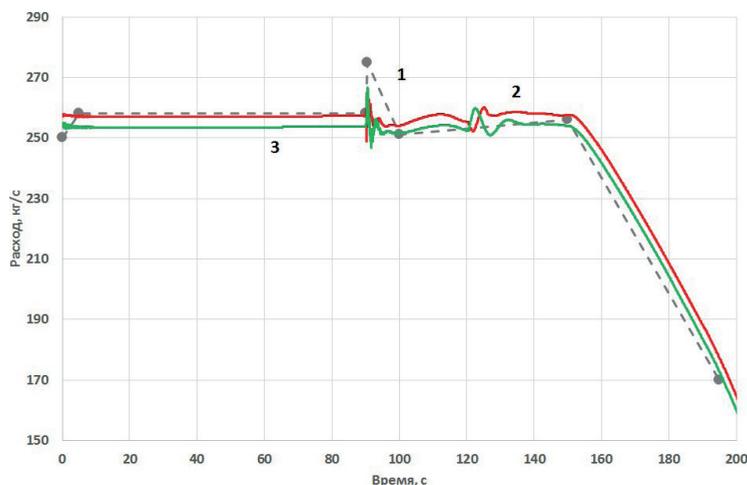


Рис. 8. Расход натрия на выходе из неаварийной секции ПГ: 1 – расход натрия на выходе из неаварийной секции ПГ (анализ); 2 – расход натрия на выходе из неаварийной секции ПГ (сторона Б, расчет); 3 – расход натрия на выходе из неаварийной секции ПГ (сторона А, расчет)

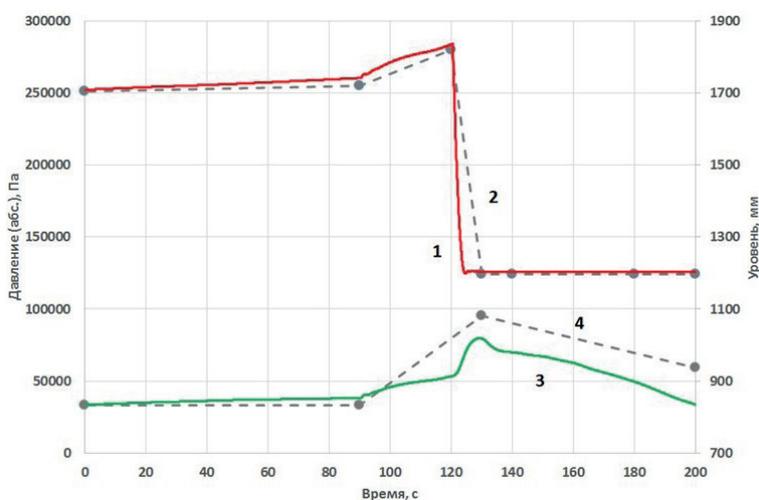


Рис. 9. Давление и уровень натрия в БН: 1 – давление газа в БН (расчет); 2 – давление газа в БН (анализ); 3 – уровень натрия в БН (расчет); 4 – уровень натрия в БН (анализ)

Таблица 2

Сравнение данных послеаварийного анализа с результатами расчетов с помощью кодов SLEAK и LLEAK-3С 1.0

| Параметр | Послеаварийный анализ | Расчет SLEAK | Расчет LLEAK-3С 1.0 |
|--|-----------------------|--------------|---------------------|
| Рост показаний ИВА-5Б1, мин | 1 | 1,2 | – |
| Рост показаний ИВА-5Б1 до 0,22 ррт, мин | 3 | 3 | – |
| Резкий рост показаний всех ИВА 5ПГ, мин | 5 | 4,2 | – |
| Время срабатывания ИШИТ, мин | 13 | 12 | – |
| Время достижения уставки 5% КАВ-7, мин | 20 | 19,8 | – |
| Расход натрия на выходе из аварийной секции, % от исходного значения | +35 | – | +62 |
| Расход натрия через неаварийные секции, % от исходного значения | +10 | – | +5 |
| Время срабатывания РМ, с | 120 | – | 120,3 |
| Рост уровня натрия в ББН, мм | +250 | – | +190 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью двух расчетных кодов SLEAK и LLEAK-3С 1.0 были смоделированы процессы, происходившие во втором контуре РУ БН-600 при течи воды в натрий в парогенераторе 19 января 1982 г.

По результатам расчета малой течи кодом SLEAK было получено хорошее совпадение расчетных данных с показаниями датчиков системы контроля течи воды в натрий.

Полученные с помощью кода LLEAK-3С 1.0 значения гидродинамических параметров достоверно описывают процессы во втором контуре БН-600 при большой течи воды в натрий и не противоречат данным послеаварийного анализа инцидента.

Результаты расчетного моделирования реального инцидента на РУ БН-600 подтверждают адекватность физико-математических моделей, реализованных в кодах SLEAK и LLEAK-3С 1.0.

Литература

1. Ashurko Y.M., Baklushin R.P. et al. Fast reactor operating experience gained in Russia: analysis of anomalies and abnormal operation cases. Unusual occurrences during LMFR OPERATION, IAEA-TEC-DOC-1180. IAEA, VIENNA, 2000. – PP. 117–144. ISSN 1011-4289.
2. Перевозников С.В., Мяздрикова О.И., Пахомов И.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ SLEAK № 2018661619, РФ, 2018.
3. Перевозников С.В., Швецов Ю.Е. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ LLEAK-3С 1.0 № 2020662541, РФ, 2020.
4. Козлов Ф.А., Кузнецов Э.К. и др. Работа парогенератора с натрием и водой и второго контура при малых течах воды в натрий. Труды физико-энергетического института. – М.: Атомиздат, 1974. – С. 120–135.
5. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. – М.: ИздАТ, 2012. – 632 с. ISBN 978-5-86656-257-2.

6. *Perevoznikov S., Shvetsov Y. et al. Modeling of hydrodynamic processes at a large leak of water into sodium in the fast reactor coolant circuit. // Nuclear Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 48.– № 5. – PP. 1162–1173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.04.010>*

Поступила в редакцию 08.04.2024

Авторы

Перевозников Сергей Владимирович, старший научный сотрудник,

E-mail: perev@ippe.ru

Михин Степан Андреевич, инженер-исследователь,

E-mail: samikhin@ippe.ru

Камаев Алексей Альфредович, начальник департамента, к.т.н.,

E-mail: kamaev@ippe.ru

Пазин Геннадий Николаевич, ведущий инженер-исследователь, к.ф.-м.н.,

Мирзеабасов Олег Ахмедбекович, ведущий инженер-исследователь, к.т.н.,

Мяздрикова Ольга Игоревна, младший научный сотрудник,

E-mail: okorzun@ippe.ru

Борисов Вячеслав Владимирович, главный специалист,

E-mail: vvborisov@ippe.ru

Пахомов Илья Александрович, начальник лаборатории,

E-mail: iapakhomov@ippe.ru

UDC 621.039.5

Computational Analysis of Large Water-to-Sodium Leak Incident in the BN-600 Steam Generator

Perevoznikov S.V., Mikhin S.A., Kamaev A.A., Pazin G.N., Mirzeabasov O.A., Myazdrikova O.I., Borisov V.V., Pakhomov I.A.

IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Ozninsk, Kaluga Reg., Russia

Abstract

The paper presents the results comparing the calculated data with the indications of water-to-sodium leak detection system and hydrodynamic parameters in the second sodium circuit, observed during the water-to-sodium leak incident in the superheater module of the BN-600 unit on January 19, 1982.

It should be noted that the reconstruction of these events in was mostly performed based on post-accident analysis data, which is rather desultory and does not describe the occurring processes accurately enough. However, this reconstruction can be used for the comparative analysis.

The calculations were performed using two codes designed to analyze the efficiency of the steam generator protection system in case of small leaks (SLEAK code) and the secondary circuit protection system against overpressure in case of large leaks (LLEAK-3C 1.0 code). The use of two calculation codes made it possible to simulate the operation of the BN-600 steam generator protection system in case of water leak in the steam generator, taking into account its leak.

Good agreement between the calculations results and post-accident analysis data was obtained.

The results of computational modeling of a real incident confirm the adequacy of physical and mathematical models, implementation of SLEAK and LLEAK-3C 1.0 codes.

Keywords: sodium coolant, sodium-water steam generator, steam generator protection system, water leaks into sodium, control system for small leaks, large leaks.

For citation: Perevoznikov S.V., Mikhin S.A., Kamaev A.A., Pazin G.N., Mirzeabasov O.A., Myazdrikova O.I., Borisov V.V., Pakhomov I.A. Computational Analysis of Large Water-To-Sodium Leak Incident in the BN-600 Steam Generator. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 93–103; DOI: <https://doi.org/10.26583/ipe.2024.2.08> (in Russian).

References

1. Ashurko Y.M., Baklushin R.P., Zagorulko Y.I., Ivanenko V.N., Matveyev V.P., Vasiliyev B.A. *Fast reactor operating experience gained in Russia: analysis of anomalies and abnormal operation cases. Unusual occurrences during LMFR OPERATION*. IAEA-TECDOC-1180, IAEA, VIENNA, 2000, pp. 117–144. ISSN 1011-4289.
2. Perevoznikov S.V., Myazdrikova O.I., Pakhomov I.A. *Certificate of state registration of the computer program SLEAK No. 2018661619*. Russian Federation, 2018 (in Russian).
3. Perevoznikov S.V., Shvetsov Y.E., Pazin G.N., Mirzeabasov O.A., Myazdrikova O.I. *Certificate of state registration of the computer program) LLEAK-3C 1.0 No. 2020662541*. Russian Federation, 2020 (in Russian).
4. Kozlov F.A., Kuznetsov E.K., Sergeev G.P., Volchkov L.G. *Operation of a steam generator with sodium and water and secondary circuit with small flows of water into sodium*. Proc. of Institute of Physics and Power Engineering. Moscow, Atomizdat, 1974, pp. 120–135 (in Russian).
5. Kuznetsov I.A., Poplavskiy V.M. *Safety of nuclear power plants with fast reactors*. Moscow, IzDAT, 2012, 632 p. ISBN 978-5-86656-257-2 (in Russian).
6. Perevoznikov S.V., Shvetsov Y.E., Kamaev A.A., Pakhomov I.A., Borisov V.V., Pazin G.N., Mirzeabasov O.A., Korzun O.I. Modeling of hydrodynamic processes at a large leak of water into sodium in the fast reactor coolant circuit. *Nuclear Engineering and Technology*. 2016, v. 48, no. 5, pp. 1162–1173. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.04.010>

Authors

Sergei V. Perevoznikov, Senior Researcher,

E-mail: perev@ippe.ru

Stepan A. Mikhin, Research Engineer,

E-mail: samikhin@ippe.ru

Aleksey A. Kamaev, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: kamaev@ippe.ru

Gennadiy N. Pazin, Leader Research Engineer, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

Oleg A. Mirzeabasov, Leader Research Engineer, Cand. Sci. (Engineering),

Olga I. Myazdrikova, Junior Researcher,

E-mail: okorzun@ippe.ru

Vyacheslav V. Borisov, Chief Specialist,

E-mail: vvborisov@ippe.ru

Iliia A. Pakhomov, Head of Laboratory,

E-mail: iapakhomov@ippe.ru