

СТАТЬИ

УДК 621.039.5

СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТЕПЛООТВОДА ОТ ВТОРОГО КОНТУРА БЫСТРОГО НАТРИЕВОГО РЕАКТОРА И ОЦЕНКА ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Аишурко Ю.М. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского», г. Обнинск)

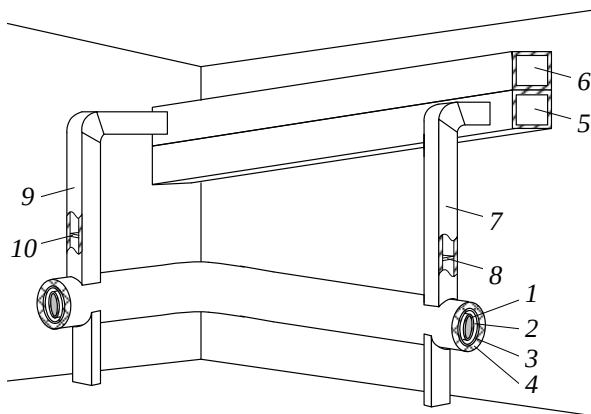
В настоящей статье рассматривается новый вариант системы аварийного теплоотвода через стенки основных трубопроводов и оборудования теплоотводящих петель реакторной установки, которая может быть использована в проектах быстрых натриевых реакторов. В отличие от системы аварийного теплоотвода только через стенки корпусов реактора, рассматриваемой в проекте американского модульного быстрого реактора PRISM [1] и допускающей использование лишь в проектах быстрых натриевых реакторов малой мощности [2], предлагаемый вариант позволяет существенно расширить мощностной диапазон ее применения. Для оценки допустимого мощностного диапазона анализируется вариант системы аварийного теплоотвода через стенки основных трубопроводов второго контура быстрого натриевого реактора электрической мощностью 1600 МВт — назовем его условно БН-1600. При этом характеристики системы аварийного теплоотвода выбраны по результатам их оптимизации применительно к реактору типа БН-800 электрической мощностью 800 МВт. Изучено влияние ключевых характеристик системы аварийного теплоотвода на ее эффективность.

Для использования наружной поверхности натриевых трубопроводов и оборудования петель второго контура для аварийного отвода остаточного тепловыделения (САОТ-2К) предлагается следующее техническое решение, обеспечивающее регулируемый отвод тепла в окружающее пространство. Все оборудование и трубопроводы, от которых предполагается отводить тепло, размещаются в страховочном кожухе с теплоизоляцией, который при нормальной работе реактора отсечен от окружающего пространства. Таким образом, в режимах нормальной эксплуатации исключаются паразитные

утечки тепла. В режимах, когда требуется организовать отвод остаточного тепловыделения от остановленного реактора, зазор между трубопроводами, оборудованием и страховочным кожухом вокруг них соединяется с окружающим пространством, обеспечивая протечку наружного воздуха через зазор и соответственно повышенный теплоотвод. Такое включение системы в работу может быть реализовано как в активном, так и пассивном варианте и является темой отдельного исследования. В теплоотводящих петлях первого и второго контуров реакторной установки перенос тепла осуществляется за счет естественной циркуляции теплоносителя, условия для возникновения которой создаются соответствующим расположением теплообменного оборудования и конфигурацией теплоотводящих петель. Тем не менее нельзя исключать из рассмотрения вариант с принудительной циркуляцией теплоносителя в первом и втором контурах, например, за счет работы циркуляционных насосов на пониженных оборотах или специальных электромагнитных насосов, как это реализовано во втором контуре БН-800. Расход воздуха в зазоре может обеспечиваться как за счет естественной, так и принудительной циркуляции (вентиляторы). В статье анализируется вариант с естественной циркуляцией воздуха, создаваемой вытяжной трубой, которая соединяется с зазором (рис. 1).

В рассматриваемом варианте коллектор отвода воздуха от зазора соединяется с вытяжной трубой, через которую нагретый воздух выбрасывается наружу, создавая тем самым тягу для естественной циркуляции воздуха в воздушном тракте.

Создание большого зазора между трубопроводами и кожухами нецелесообразно из-за необходимости экономии объема помещений.



Р и с. 1. Компоновка секции САОТ-2К для основного трубопровода второго контура быстрого натриевого реактора: 1 — основной натриевый трубопровод; 2 — зазор между основным трубопроводом и страховочным кожухом; 3 — страховочный кожух; 4 — теплоизоляция; 5, 6 — коллектор подвода и отвода воздуха соответственно; 7, 9 — подводящий и отводящий воздухопровод секции соответственно; 8, 10 — отсечной шибер секции на подводе и отводе воздуха соответственно

Кроме того, уменьшение ширины зазора приводит к возрастанию скорости протекающего в нем воздуха и, следовательно, к увеличению коэффициента теплоотдачи к воздуху. Однако при этом возрастает и гидравлическое сопротивление, что снижает расход воздуха. Если выполнить зазор приемлемой ширины для всей петли второго контура с одним подводом и одним отводом потока воздуха, то гидравлическое сопротивление будет значительным и не позволит организовать отвод требуемого количества теплоты.

Для повышения эффективности САОТ-2К предлагается разделить зазор на несколько параллельных со стороны воздуха секций, соединенных с общей вытяжной трубой. Отметим, что страховочный кожух выполняет при нормальной работе реактора локализующие функции, повышая, таким образом, противопожарную безопасность быстрых натриевых реакторов.

Эффективность САОТ-2К зависит от многих параметров:

площади поверхности, от которой отводится тепло;

ширины зазора, влияющей на его гидравлическое сопротивление и коэффициент теплоотдачи к воздуху;

числа параллельных секций, на которые разбивается зазор;

высоты вытяжных труб;

коэффициента теплового излучения материалов трубопроводов и оборудования петель второго контура и страховочного кожуха;

уровня естественной циркуляции теплоносителя в контурах реакторной установки.

Опыт аналогичных систем, в частности, воздушного охлаждения трубных пучков микромодульных парогенераторов реактора «Феникс» (Франция) и БН-350, аварийного теплоотвода через корпуса реактора PRISM показывает, что отводимая мощность ограничена прежде всего возможностями теплоотвода воздухом, в то время как перенос тепла по натриевым контурам за счет естественной циркуляции теплоносителя не представляет принципиальных трудностей. В рассматриваемой работе первоочередное внимание направлено на обоснование возможности отвода требуемого уровня мощности потоком воздуха. При этом полагаем, что перенос остаточного тепла по контурам реакторной установки за счет естественной циркуляции теплоносителя в них обеспечен. Поэтому для анализа САОТ-2К использовали специально разработанный код SARB, который детально моделирует именно процессы, протекающие в воздушном тракте САОТ-2К.

Анализ САОТ-2К выполнен применительно к БН-800, -1600 при следующих исходных предположениях:

для теплоотвода используем только поверхность основных трубопроводов второго контура (поверхность парогенераторов и другого оборудования второго контура, а также поверхность корпусов реактора не учитываем);

учитываем только унос тепла потоком воздуха, протекающим в зазоре, без тепловых потерь через теплоизоляцию страховочных кожухов;

при расчете суммарной теплоемкости объекта учитываем теплоемкость теплоносителя и металлоконструкций первого контура, а также функционирующих петель второго контура, включая все их оборудование;

для простоты расчетов полагаем, что все параллельные секции, на которые разделяется зазор между натриевым трубопроводом и страховочным кожухом, идентичны;

рассматриваем вариант без специального увеличения поверхности теплообмена с воздухом в зазоре.

Как сказано, эффективность САОТ-2К, в первую очередь, ограничивается возможностями воздушного тракта, в частности, теплопередачей к воздуху. С этой целью в коде SARB предусмотрено детальное моделирование нестационарных теплогидравлических процессов, протекающих в воздушном тракте САОТ-2К, в частности, теплопередачи к потоку воздуха, в то время как динамика натриевых контуров моделируется с помощью двухемкостной модели — натрий в баке реактора и теплоотводящих петель и металлоконструкции бака реактора и теплоотводящих петель [3].

В качестве критерия оптимизации параметров САОТ-2К выбрана максимальная среднесмешанная температура теплоносителя в баке реактора, реализуемая при аварийном теплоотводе.

Для исследования характеристик САОТ-2К использовали следующие исходные данные:

	БН-800	БН-1600
Тепловая мощность реактора, МВт . . .	2100	4200
Объем теплоносителя, м ³ :		
в баке реактора . . .	950	3090
в петле второго контура . . .	300	535
Длина трубопроводов второго контура, охлаждаемых воздухом, м . . .	270	240
Температура наружного воздуха, °С . . .	30	30
Начальная среднесмешанная температура теплоносителя в контурах, °С . . .	450	450
Число функционирующих петель в режиме аварийного теплоотвода . . .	2	2—6

Коэффициенты сопротивления трения элементов воздушного тракта определяются в соответствии с выбранными геометрическими размерами.

В расчетах варьировали следующие параметры САОТ-2К:

ширина зазора между основным натриевым трубопроводом и страховочным кожухом;

коэффициент теплового излучения материалов основного трубопровода и страховочного кожуха;

высота вытяжных труб;

число параллельных секций, на которые разделяется зазор между основным натриевым трубопроводом и страховочным кожухом в каждой из петель второго контура;

число функционирующих петель второго контура при аварийном теплоотводе.

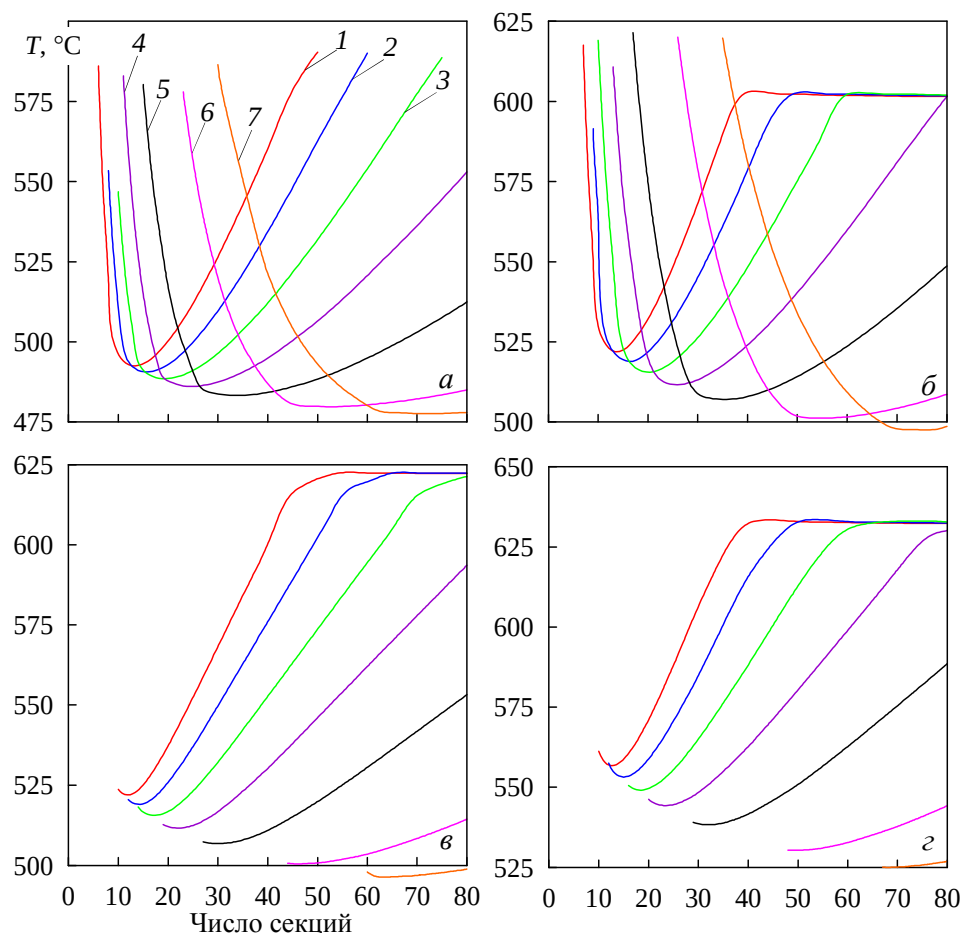
Полагаем, что материал основного трубопровода и страховочного кожуха имеет одинаковый коэффициент теплового излучения и рассматриваем для него два базовых значения 0,25 и 0,85, для высоты вытяжных труб — 30 и 60 м. Выбор указанных коэффициентов теплового излучения материалов стенок трубопроводов обусловлен следующими соображениями — 0,25 соответствует коррозионно-стойкой стали типа 1X18H10T без специальной обработки, 0,85 — со специальной обработкой поверхности металла [4]. Исследовали зависимость максимальной среднесмешанной температуры теплоносителя при аварийном теплоотводе от коэффициента теплового излучения материала трубопроводов и высоты вытяжных труб.

Ширину зазора между основным натриевым трубопроводом и страховочным кожухом варьировали в диапазоне 1,5—7 см, число секций, на которые разделяется САОТ-2К в каждой петле, — 6—80. Очевидно, что реализация большого числа секций будет затруднительна как из-за ограничений на минимально возможную длину отдельной секции, так и вследствие большого числа подводящих и отводящих воздухопроводов. Однако на стадии предварительного анализа данной системы ставится задача выявить характер зависимости ее эффективности от разных параметров в широком диапазоне их изменения.

Для рассматриваемого типа САОТ-2К нет данных об определяющих характеристиках, степени влияния того или иного параметра на ее эффективность. Поэтому для глубокого понимания взаимосвязи между различными характеристиками САОТ-2К и степени их влияния на ее эффективность были выполнены параметрические исследования применительно к БН-800.

Принимая во внимание требование нормативно-технических документов об учете единичного отказа при функционировании систем безопасности, рассмотрим наиболее неблагоприятный случай, связанный с отказом одной теплоотводящей петли, например, вследствие закрытия обратного клапана на напоре ГЦН-1. Таким образом, остаточное тепловыделение от БН-800, остановленного после длительной работы на номинальном уровне мощности, отводится через две петли второго контура.

Показанные на рис. 2 зависимости максимальной среднесмешанной температуры теплоносителя при аварийном теплоотводе демонст-



Р и с. 2. Зависимость максимальной среднесмешанной температуры теплоносителя в БН-800 от числа секций в САОТ-2К при высоте вытяжной трубы H 60 м, коэффициенте теплового излучения стенок ϵ 0,85 и 0,25 (а, в), H 30 м, ϵ 0,85 и 0,25 (б, г), ширине зазора 7 (1), 6 (2), 5 (3), 4 (4), 3 (5), 2 (6), 1,5 см (7)

пируют наличие минимума в рассмотренном диапазоне изменения числа секций САОТ-2К, соответствующего оптимальному числу секций, которое снижается с уменьшением ширины зазора (рис. 3).

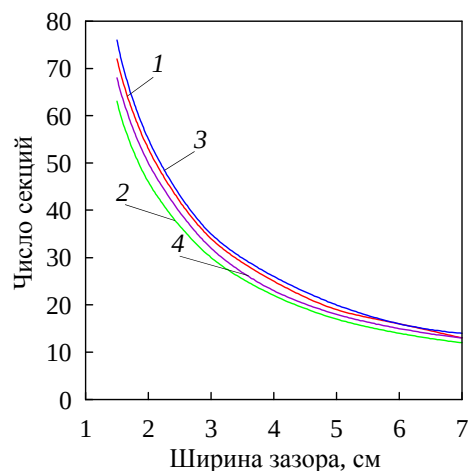
Анализ влияния ключевых характеристик САОТ-2К на температуру теплоносителя в режиме аварийного теплоотвода показывает, что ширину зазора между трубопроводом и страховочным кожухом целесообразно выбрать равной 5 см (рис. 4). Это позволяет ограничиться разумным числом секций, на которые разделяется зазор в каждой петле, — не более 20 (что соответствует длине каждой секции ~14 м). Высота вытяжных труб должна быть не менее 30 м (см. рис. 4, б). На рис. 4, а видно, что зависимость максимальной температуры натрия от коэффициента теплового излучения в реально достижимом диапазоне не является ключевой, следовательно, отпадает необходимость в подборе специальных материалов для стенок тру-

бопроводов второго контура и страховочного кожуха с высоким коэффициентом теплового излучения.

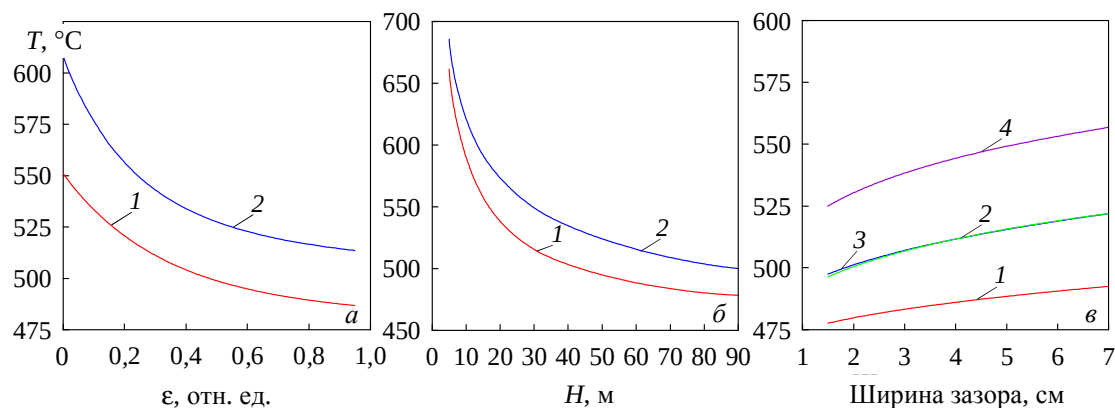
Полученные результаты показывают, что предлагаемая САОТ-2К позволяет отвести остаточное тепло от БН-800, остановленного с номинального уровня мощности, без превышения проектной температуры даже с учетом отказа одной петли второго контура.

Анализ возможности использования САОТ-2К в быстром натриевом реакторе большой мощности выполнен на примере БН-1600 с учетом результатов оптимизации ее параметров применительно к БН-800. Ширина зазора между трубопроводами и страховочным кожухом выбрана равной 5 см. Число секций, на которые разбивается зазор, выбира-

лось в интервале 15—20. Остаточное тепловыделение в БН-1600, остановленном с номинального уровня мощности, может быть отведено без превышения проектной температуры даже в



Р и с. 3. Зависимость оптимального числа секций в САОТ-2К от ширины зазора для БН-800 при высоте вытяжной трубы H 60 м, коэффициенте теплового излучения стенок ϵ 0,85 (1) и 0,25 (2), H 30 м, ϵ 0,85 (3) и 0,25 (4)



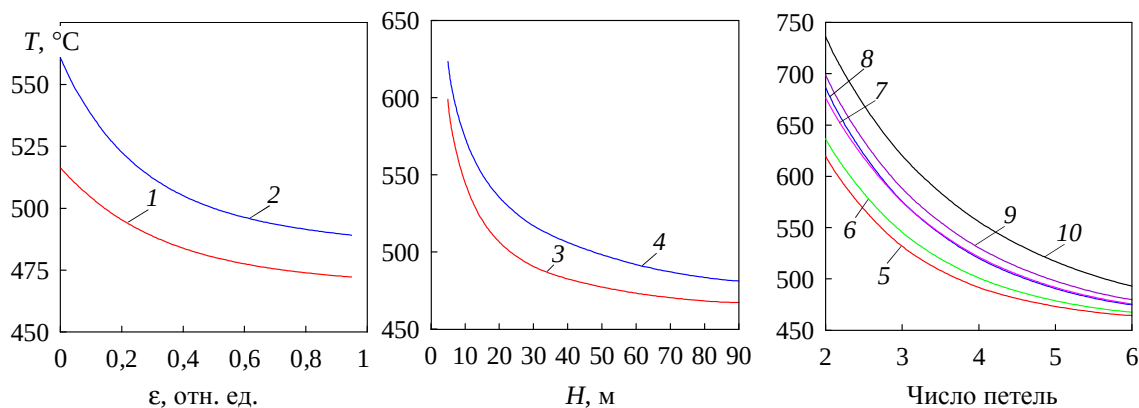
Р и с. 4. Зависимость максимальной среднесмешанной температуры теплоносителя в БН-800 при ширине зазора 5 см (а, б) от коэффициента теплового излучения стенок ϵ (а), H 60 м (1), 30 м (2), высоты вытяжной трубы H (б), ϵ 0,85 (1), 0,25 (2), ширины зазора (в), H 60 м, ϵ 0,85 (1), 0,25 (2), H 30 м, ϵ 0,85 (3), 0,25 (4)

случае отказа двух петель из шести и без превышения безопасного предела по температуре при отказе трех из шести петель (рис. 5, 6). Результаты, полученные для БН-1600, свидетельствуют о возможности использования подобных систем в быстрых натриевых реакторах любой мощности.

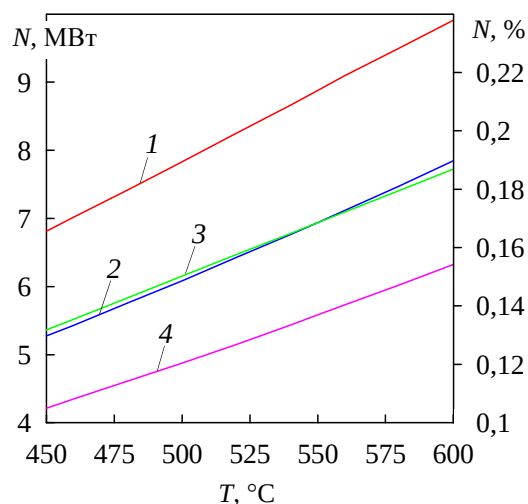
К преимуществам рассматриваемой САОТ-2К можно отнести возможность в максимальной степени использовать основное оборудование реакторной установки и, таким образом, отказаться от специальных систем аварийного теплоотвода и дорогостоящего теплообменного оборудования. Кроме того, при отказе от специальных теплообменников натрий—воздух исключается опасность замерзания натрия в теплопередающих трубках теплообменника как в переходных режимах включения САОТ в работу, так и в режиме ее поддержания в «горячем» резерве, что существенно повышает надежность аварийного теплоотвода

и безопасность реакторной установки. В качестве недостатков следует указать на наличие большого числа отсечной арматуры со стороны воздуха. Однако это не оказывает заметного влияния на надежность системы, так как одиночные отказы арматуры и даже нескольких элементов не приводят к отказу канала САОТ из-за параллельной схемы соединения воздушных зазоров. Ошибочное открытие воздушных зазоров при работе реактора на мощности приведет лишь к незначительному снижению к.п.д. энергоблока на долю мощности САОТ-2К, которая, как показали расчеты, не превысит 1,5% номинальной.

Следует отметить, что САОТ-2К выполняет в быстром натриевом реакторе дополнительно функции локализирующего барьера, который позволяет в значительной степени повысить его безопасность по отношению к течениям натрия. Возникновение течи натрия в одной из петель второго контура в режиме функционирования



Р и с. 5. Зависимость максимальной среднесмешанной температуры натрия в БН-1600 при ширине зазора 5 см от коэффициента теплового излучения стенок ϵ , H 60 м (1), 30 м (2), высоты вытяжной трубы H , ϵ 0,85 (3), 0,25 (4), числа петель, H 60 м, ϵ 0,85 (5), 0,55 (6), 0,25 (7), H 30 м, ϵ 0,85 (8), 0,55 (9), 0,25 (10)



Р и с. 6. Зависимость мощности, отводимой в одной петле второго контура БН-1600, от температуры теплоносителя при высоте вытяжной трубы H 60 м, коэффициенте теплового излучения стенок ϵ 0,85 (1) и 0,25 (2), H 30 м, ϵ 0,85 (3) и 0,25 (4)

САОТ-2К вызовет лишь отказ одного канала (петли) системы, что, как показали расчеты, не приводит к отказу в выполнении функции аварийного теплоотвода и превышению пределов безопасной эксплуатации реакторной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Status of Fast Reactor Research and Technology Development. IAEA-TECDOC-1691. Vienna: IAEA, 2012.
2. Ashurko Yu.M., Lazarenko G.E. Characteristics of systems of emergency decay heat removal through reactor vessel wall and possible ways of their efficiency increase. — In: Proc. of an Intern. Top. Meeting on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. Obninsk, 3—7 October, 1994, v. 4, p. 6.24—6.38.
3. Ашурко Ю.М. Система аварийного теплоотвода от контуров реакторной установки и оценка ее эффективности: Препринт ФЭИ-2913, 2001.
4. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974.

Поступила в Редакцию 3.10.17

УДК 621.311.25:621.039.5

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ВНУТРИРЕАКТОРНОГО КОНТРОЛЯ ВВЭР В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Семенухин А.В., Саунин Ю.В., Рясный С.И. (АО «Атомтехэнерго», г. Москва)

Надежность выполнения системой внутриреакторного контроля СВРК эксплуатационных задач во многом зависит от достоверности входной информации, поэтому диагностика состояния и достоверность показаний каналов контроля являются одной из важных штатных функций первичной обработки [1]. Кроме того, в соответствии с нормативными требованиями [2] при эксплуатации энергоблока проводятся периодические регламентные проверки и испытания СВРК с расширенным анализом показаний каналов, сложность и громоздкость которых определяются как их большим числом (~1 тыс.), так и методом проверки на достоверность, включающим «ручные» операции. При этом очевидно, что в период между регламентными проверками и испытаниями возможна вероятность функционирования системы с неявными и развивающимися дефектами, которые не выявляются штатными функциями диагностики. Поэтому в настоящее время определены требова-

ния к использованию на АЭС технологий диагностики в режиме реального времени [3—6]. В настоящей статье рассматривается один из методических подходов, использованный при разработке системы диагностики входной информации СВРК, функционирующей в режиме реального времени. Эта система диагностики была успешно опробована при вводе в эксплуатацию энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2 [7]. Предлагаемый методический подход служит для автоматической оценки достоверности информации каналов СВРК и является развитием методов [8, 9], применяемых при обработке информации.

Основные положения методики. Для определения достоверности показаний каналов контроля анализируются среднее значение и погрешность измерения на выбранном интервале наблюдения. Под каналом контроля понимаются проектные программно-технические средства (первичные и вторичные преобразователи, ли-