

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРНОГО РАСТВОРА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Д.В. Билей*, **В.Г. Соловьев****, **Ю.А. Комаров*****, **В.И. Скалзубов*****

* Национальная Атомная Энергогенерирующая Компания «Энергоатом», Киев, ул. Арсенальная, 9/11

** Одесский государственный экологический университет, Одесса, ул. Львовская, 15

*** Одесский филиал ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»,

Одесса, Гагаринское плато, 5

E-mail: gntcod@te.net.ua

Поступила в редакцию 10 июля 2003 г.

В работе представлена разработка и обоснование математической модели, которая является ядром разработанной методики оптимизации системы контроля концентрации борного раствора теплоносителя реакторных установок (КБР РУ). В основу модели положен риск-ориентированный подход и вероятностные методы моделирования надежности системы измерения КБР РУ. На основе эксплуатационных данных (технологические схемы оборудования РУ, в которых реализована КБР; статистика отказов и дефектов оборудования датчиков непрерывного контроля (НАР-Б), арматуры РУ и спецкорпуса; данные по изменению концентрации борной кислоты в точках контроля) и разработанной математической модели можно оценить/обосновать возможность устранения непрерывного контроля с помощью НАР-Б и определить необходимое изменение периодичности пробоотбора для обеспечения неснижения надежности системы контроля. То есть применение данной методики позволяет обосновать возможность сокращения проектного количества датчиков НАР-Б.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность, контроль, концентрация, измерение, теплоноситель, борный раствор, НАР-Б, реактор.

Проектами атомных электростанций с ВВЭР на основании детерминистских подходов и/или без необходимого обоснования определены состав и количество средств эксплуатационного контроля (ЭК). Опыт эксплуатации энергоблоков с ВВЭР показывает, что в ряде случаев часть средств ЭК используется неэффективно и приводит к излишней нагрузке на эксплуатирующую организацию. Так, проектом для энергоблока типа ВВЭР-1000 определены свыше 20-ти систем непрерывного контроля концентрации борного раствора – НАР-Б. Опыт эксплуатации показывает неэффективность использования значительной части НАР-Б. В частности, на французских реакторах используются только несколько аналогичных систем ЭК [1, п.7.1]. Многие НАР-Б на АЭС Украины уже исчерпали назначенный ресурс (срок службы). Поэтому требуется либо замена этих дорогостоящих систем, либо продление ресурса (при этом, не всегда обоснованно). При этом проектом системы контроля концентрации борного раствора теплоносителя реакторных установок (СКБ РУ) предусмотрен как непрерывный (с помощью НАР-Б), так и периодический контроль (с помощью химического анализа проботборов – ХПО).

В основе измерения концентрации борного раствора теплоносителя НАР-Б лежит существенная и однозначная зависимость потока поглощенных нейтронов от концентрации борного раствора (кислоты H_3BO_3). НАР-Б состоит из датчика, предназначенного для детектирования нейтронов и формирования импульсов, и пульта измерительного базового (ПИБ), предназначенного для преобразования зависимости скорости счета в значение концентрации борной кислоты, а также для управления и обслуживания НАР-Б [2, п.6.1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многолетний опыт эксплуатации отечественных реакторных установок с ВВЭР показал неэффективность использования около трети всех НАР-Б на блок (в основном для систем безопасности гидроемкостей, в которых изменения концентрации H_3BO_3 происходит крайне редко). Обоснованное сокращение на треть количества НАР-Б, например, для украинских АЭС с ВВЭР позволит сэкономить не менее 3 млн. долл. США. Однако СКБ РУ относится к системам, важным для безопасности АЭС. Поэтому эффективное, с точки зрения экономики, снижение общего количества НАР-Б не должно снижать проектный уровень надежности СКБ РУ в целом.

Таким образом, актуальна разработка научного обоснования оптимизации СКБ РУ, основанная на двух принципах:

- максимально допустимое снижение проектного количества НАР-Б;
- сохранение необходимого уровня надежности измерения концентрации борного раствора в системе теплоносителя реакторных установок.

Современная международная практика принятия подобных технических решений, влияющих на безопасность АЭС, показала эффективность использования риск-ориентированных подходов (РОП) [3 п.8.0, 4 п.5.5]. В

основе РОП – вероятностная оценка изменения риска (критерия безопасности) при внедрении различных технических решений/изменений факторов, влияющих на безопасность. Авторами [5 разд.2, 6], в рамках РОП и в соответствии с Программой внедрения риск-ориентированных подходов в регулирующей деятельности и эксплуатации АЭС Украины (совместная программа НАЭК «Энергоатом» и Государственного комитета ядерного регулирования Украины) разработана концепция оптимизации СКБ РУ, которая фактически сводится к определению характеристик непрерывного и периодического контроля, удовлетворяющих условию:

$$P(T) \geq R_c(T_{pez}), \quad (1)$$

где P – вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений, проведенными исключительно с помощью химического анализа проб (периодический контроль); T – варьируемая периодичность пробоотбора; R_c – вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений, проведенными как с помощью НАР-Б, так и с помощью химического анализа проб; T_{per} – регламентная периодичность пробоотбора.

В настоящей работе представлено развитие этой концепции в части конкретизации математической модели оптимизации СКБ РУ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ДОПУЩЕНИЯ

1. Все точки контроля H_3BO_3 с НАР-Б могут быть условно разделены на две группы:

- точки контроля, в которых концентрация борной кислоты не должна изменяться, т.е. в этих точках контролируется уровень концентрации для подтверждения его *неизменности*;
- точки контроля, в которых по технологическим причинам концентрация борной кислоты может (или должна) изменяться, т.е. в этих точках контролируется уровень концентрации для подтверждения правильности его текущих значений либо правильности его *изменения*.

Первая группа точек контроля охватывает измерение уровня концентрации борной кислоты в растворах, находящихся в баках (гидроемкостях, баках запаса теплоносителя, баках запаса борного концентрата и т.д.). В качестве потенциальных сценариев, влияющих на изменение концентрации в точке контроля, в данной работе рассмотрены только сценарии, связанные с перетечками сред. То есть рассматриваются сценарии с несанкционированным попаданием в подконтрольный раствор раствора с другим уровнем концентрации борной кислоты.

Разработка сценариев основана на:

- анализе гидравлических соединений баков с другим оборудованием энергоблока;
- выявлении связей бака с оборудованием, содержащим борный раствор с уровнем концентрации, отличным от уровня концентрации в анализируемом баке;
- определении оборудования (задвиги, обратные клапаны и т.д.), отказы которого (ложное открытие, внутренняя негерметичность и т.д.) приводят к реализации несанкционированной протечки раствора в анализируемый бак.

Для второй группы точек контроля характерна частая смена (от нескольких единиц до сотен раз в год) уровня концентрации борной кислоты. Поэтому для второй группы точек контроля есть возможность определить частоту изменения уровня концентрации на основании анализа эксплуатационных данных.

В качестве эксплуатационных данных используется информация о концентрации H_3BO_3 из оперативных журналов, в которые каждую смену вносятся значения по всем подконтрольным точкам. На основании этих данных можно получить дискретную зависимость изменения $C_{H_3BO_3}$ от времени:

$$C_{H_3BO_3} = f(C(t_1), C(t_2), \dots, C(t_n)), \quad (2)$$

где $C(t_i)$ – уровень концентрации борной кислоты в точке контроля, зафиксированный в момент t_i ; n – количество анализируемых замеров.

2. При измерении концентрации с помощью НАР-Б достоверность результатов измерений зависит от:

- точности измерений (определяется классом точности прибора);
- надежности НАР-Б;
- условий установки датчика.

При химическом анализе проб достоверность результатов измерений зависит от:

- точности измерений;
- частоты изменения концентрации в точке контроля;
- частоты/периодичности отбора проб (поскольку в интервале между замерами концентрация раствора может изменяться);
- и времени замера (от момента возникновения необходимости получения информации об уровне концентрации в точке контроля до момента получения такой информации).

Таким образом, вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений, проведенными исключительно с помощью периодического контроля, зависит от следующих величин:

$$P = f_i(\theta(t), p_x, T, T_3), \quad (3)$$

где $\theta(t)$ – частота реального изменения концентрации H_3BO_3 , которая характеризует количество изменения кон-

центрации в единицу времени; p_x – вероятность корректного определения концентрации H_3BO_3 в химлаборатории (на один пробоотбор); T – варьируемая периодичность пробоотбора; T_3 – время замера, от момента возникновения необходимости информации об уровне концентрации в точке контроля до момента получения такой информации.

Вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений, проведенными как с помощью НАР-Б, так и с помощью химического анализа проб R_c , является базовой величиной, которая характеризует достоверность измерений при существующей системе контроля (НАР-Б плюс химический анализ проб), и существующей периодичности химический отбора и анализ проб ($T=T_{рег}$). Вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений, проведенными как с помощью НАР-Б, так и с помощью химического анализа проб, зависит от следующих величин:

$$R_c = f_2(\theta(t), p_x, T_{рег}, p_{НАР-Б}, p_{xНАР-Б}, p_{yНАР-Б}), \quad (4)$$

где $\theta(t)$ – частота реального изменения концентрации H_3BO_3 , которая характеризует количество изменений концентрации в единицу времени; p_x – вероятность корректного определения концентрации H_3BO_3 в химлаборатории (на один пробоотбор); $T_{рег}$ – регламентная периодичность пробоотбора; $p_{НАР-Б}$ – вероятность неверной индикации уровня концентрации боной кислоты вследствие отказа НАР-Б; $p_{xНАР-Б}$ – вероятность корректного определения концентрации H_3BO_3 с помощью НАР-Б, при условии его работоспособности (определяется классом точности прибора); $p_{yНАР-Б}$ – вероятность избежать ошибки, возникающей вследствие условий установки датчика (некомпенсируемый нейтронный шум, косвенный замер и т.д.)

3. Оптимальная периодичность ХПО определяется из условия:

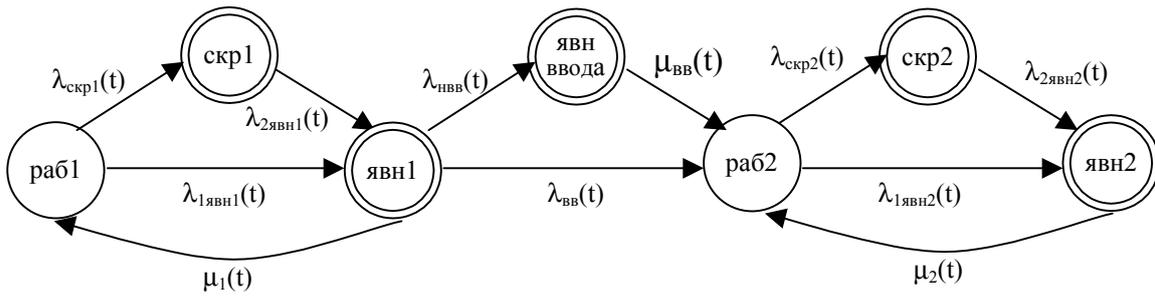
$$T^* = \max \text{Arg}(P(T) \geq R_c). \quad (5)$$

4. Вероятность корректного определения концентрации борной кислоты с помощью НАР-Б при условии его работоспособности ($p_{xНАР-Б}$) имеет нормальное распределение, что обосновывается спецификой эксплуатации НАР-Б и возможностью применения центральной предельной теоремы теории вероятности [7 п.5.5]. Значение вероятности корректного определения концентрации, которая зависит от точности прибора, определяется двумя составляющими:

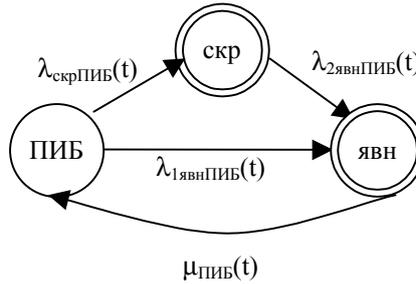
- вероятностью того, что результаты измерений покажут отклонение за границы допустимого диапазона при значениях реальной концентрации внутри данного диапазона P_1 ;
- вероятностью того, что результаты измерений покажут концентрацию в границах нормы при значениях реальной концентрации за пределами допустимых значений P_2 .

5. Каналы датчика и ПИБ могут иметь как явный, так и скрытый отказ. В случае явного отказа элемент (канал датчика или ПИБ) ремонтируется и возвращается в работоспособное состояние. В случае скрытого отказа элемент находится в этом состоянии до того момента, пока на скрытый отказ не наложится явный отказ. В этом случае элемент переходит в состояние явного отказа, ремонтируется и возвращается в работоспособное состояние. В соответствии с вышеизложенным базовая модель надежности НАР-Б представлена на рис.1.

На рис.1 использованы следующие обозначения: раб1, раб2 – работоспособное состояние первого и второго (основного и резервного) каналов датчика, соответственно; скр1, скр2 – скрытый отказ первого и второго каналов датчика, соответственно; явн ввода – явный отказ датчика, связанный с вводом резервного канала (при условии, что основной канал находится в отказе); явн1, явн2 – явный отказ первого и второго каналов датчика, соответственно (отказ, не связанный с действиями персонала по вводу резервного канала); ПИБ – работоспособное состояние ПИБ; скр – скрытый отказ ПИБ; явн – явный отказ ПИБ; $\lambda_{скр1}(t)$, $\lambda_{скр2}(t)$ – интенсивность возникновения скрытых отказов первого и второго (основного и резервного) каналов датчика, соответственно; $\lambda_{1явн1}(t)$, $\lambda_{1явн2}(t)$ – интенсивность возникновения явного отказа, который возник непосредственно после работоспособного состояния первого и второго каналов датчика, соответственно; $\lambda_{2явн1}(t)$, $\lambda_{2явн2}(t)$ – интенсивность возникновения явного отказа (проявление скрытого отказа) при условии, что до этого канал какое-то время находился в состоянии отказа, для первого и второго каналов датчика, соответственно; $\mu_1(t)$, $\mu_2(t)$ – интенсивность восстановлений явных отказов (величина, обратная длительности ремонта) первого и второго каналов датчика, соответственно; $\lambda_{вв}(t)$ – интенсивность верного ввода в работу резервного канала датчика. Величина прямо пропорциональна вероятности безошибочных действий персонала по вводу в работу резервного канала ($p_{вв}$) и обратно пропорциональна длительности операций по вводу в работу резервного канала; $\lambda_{нвв}(t)$ – интенсивность неверного ввода в работу резервного канала датчика. Величина прямо пропорциональна $1-p_{вв}$ и обратно пропорциональна длительности операций по вводу в работу резервного канала; $\mu_{вв}(t)$ – интенсивность восстановительных операций по устранению ошибочных действий персонала при вводе в работу резервного канала; $\lambda_{скрПИБ}(t)$ – интенсивность возникновения скрытых отказов ПИБ; $\lambda_{1явнПИБ}(t)$ – интенсивность возникновения явного отказа ПИБ, который возник непосредственно после его работоспособного состояния; $\lambda_{2явнПИБ}(t)$ – интенсивность возникновения явного (проявление скрытого) отказа при условии, что до этого ПИБ какое-то время находился в состоянии скрытого отказа; $\mu_{ПИБ}(t)$ – интенсивность восстановлений явных отказов ПИБ.



а) граф состояний для датчика



б) граф состояний для ПИБ

Рис. 1. Базовые модели надежности НАР-Б
 ○ работоспособное состояние каналов датчиков и ПИБ
 ⊙ состояние, при котором весь НАР-Б находится в отказе (явном или скрытом)

Следует отметить, что в общем случае интенсивности переходов не являются константами, а являются функциями времени и могут зависеть от среднего количества переходов из состояния в состояние.

6. Принимаются следующие возможные причины неверных показаний НАР-Б (отклонения показаний от значений концентрации борной кислоты в подконтрольном растворе), которые так или иначе связаны с условиями установки датчика НАР-Б:

1) влияние некомпенсируемого переменного нейтронного фона;

2) место установки датчика не позволяет (не всегда или не в полном объеме) проводить контроль концентрации борной кислоты в подконтрольном растворе (косвенный замер).

Вероятности избежать ошибки в показаниях НАР-Б в результате некомпенсируемого переменного нейтронного шума $p_{уНАР-Б1}(t)$ и косвенного замера $p_{уНАР-Б2}(t)$ являются независимыми. Поэтому вероятность избежать ошибки, возникающей вследствие условий установки датчика, будет определяться произведением указанных вероятностей:

$$p_{уНАР-Б}(t) = p_{уНАР-Б1}(t) \cdot p_{уНАР-Б2}(t). \quad (6)$$

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На основании принятых положений и допущений математической модели оптимизации СКБ РУ интегральная стационарная вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений с помощью периодического контроля составит:

$$P(T) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} r(x, T) dx, \quad (7)$$

где T_a – период регенерации, после которого распределения (частоты изменения концентрации, интенсивности отказов компонентов и т.д.) обнуляют свою наработку, т.е. в данной точке случайный процесс начинается с известного начального состояния.

Интегральная вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений, оцененных как с помощью НАР-Б, так и с помощью химического анализа проб, составит:

$$R_c(T, T_n) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} \{1 - [1 - p_{НАР-Б}(x, T_n)] [1 - r(x, T)]\} dx, \quad (8)$$

где $p_{НАР-Б}(x, T_n)$ – вероятность достоверных показаний НАР–Б; $r(x, T)$ – вероятность достоверных данных хим-контроля; T_n – периодичность восстановления ПИБ НАР–Б; T – периодичность отбора проб (регламентная); T_a – период регенерации.

Вероятность совпадения концентрации H_3BO_3 с результатами измерений с помощью периодического контроля составит:

$$r(x, T) = p_x \frac{p_{изм}(x + T_3)}{p_{изм}\left(T\left[\frac{x}{T}\right]\right)}, \quad (9)$$

где p_x – вероятность корректного определения H_3BO_3 в химлаборатории (на один отбор); $p_{изм}(t)$ – функция вероятности того, что концентрация H_3BO_3 не изменится в данной точке контроля за время t ; $[y]$ – целая часть от y ; T – периодичность проведения отбора проб; T_3 – время замера от момента возникновения необходимости информации об уровне концентрации в точке контроля до момента получения такой информации.

Тогда из выражений (8) и (9) при $T_n=T$, $T_a=T$ следует:

$$P(T) = \frac{1}{T} \int_0^T p_x \frac{p_{изм}(x + T_3)}{p_{изм}\left(T\left[\frac{x}{T}\right]\right)} dx. \quad (10)$$

$$R_c(T) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} \left\{ 1 - \left(1 - p_x p_{изм}\left(x + T_3 - T\left[\frac{x}{T}\right]\right) \right) \cdot \left\{ 1 - p_{xНАР-Б} (1 + \lambda_\partial x) \exp\left(-\lambda_\partial x - \lambda_n \left(x - T\left[\frac{x}{T}\right]\right)\right) \right\} \right\} dx. \quad (11)$$

В рамках принятых допущений вероятность изменения концентрации в подконтрольном растворе составит

$$p_u(x) = \exp\left(-\int_0^x \theta(t) dt\right), \quad (12)$$

а вероятность отказа НАР–Б:

$$p_{НАР-Б}(x, T_n) = (1 + \lambda_\partial x) \exp\left\{-\lambda_\partial x - \lambda_n \left(x - T_n \left[\frac{x}{T_n}\right]\right)\right\}, \quad (13)$$

где λ_∂ – интенсивность отказов одного канала датчика; λ_n – интенсивность отказов ПИБ.

Вероятность избежать ложных показаний в результате неконтролируемого переменного нейтронного шума $P_{уНАР-Б1}$ определяется по выражению (П.1.4) [8 стр.195], а вероятность истинных показаний при установке датчика на напорной линии определяется временем работы насоса по линии рециркуляции:

$$P_{уНАР-Б2} \approx \frac{t_{рец}}{T_\Sigma}, \quad (14)$$

где $t_{рец}$ – суммарное время, в течение которого раствор из бака прокачивается через датчик за T_Σ – период, за который было определено $t_{рец}$.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, используя необходимые эксплуатационные данные по технологическим схемам, в которых осуществляется СКБ РУ, по статистике отказов и дефектов оборудования НАР–Б, арматуры реакторного отделения и спецкорпуса, по изменению концентрации H_3BO_3 в точках контроля, можно на основе представленной выше математической модели оценить/обосновать возможность устранения непрерывного контроля с помощью НАР–Б и соответствующие изменения характеристик периодического контроля.

В результате проведенного научного исследования сформулированы следующие выводы:

1. Основным критерием анализа является сравнение степени достоверности показаний различных систем контроля концентрации борной кислоты в точках контроля (систем, которые содержат НАР–Б и химический анализ проб, либо исключительно химический анализ проб).

2. Устранение позиции НАР–Б и переход на исключительно периодический контроль с помощью химического анализа проб возможно, если периодичность последнего составит не более значения максимальной периодичности, при которой вероятность совпадения концентрации борного раствора с результатами измерений без НАР–Б не ниже соответствующей вероятности с применением НАР–Б. При этом степень достоверности показаний по концентрации борной кислоты в точках контроля не снижается.

3. Обоснованы подходы к моделированию и численной оценке частоты/ вероятности изменения концентрации борной кислоты в подконтрольных растворах.

4. Разработана математическая модель и методика, позволяющая проводить реалистичную численную оценку надежности компонентов НАР-Б и консервативную оценку надежности арматуры, участвующей в сценариях с несанкционированным проникновением борного раствора, аналитико-статистическим методом с использованием эксплуатационных статистических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Либман Ж. О ядерной безопасности. – Институт по ядерной и радиационной безопасности IPSN, 1997.
2. Анализатор раствора нейтронный – базовый НАР-Б. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. еИИ.560.040. – 1990. – 125 с.
3. Measures of Risk Importance And Their Applications (NUREG/CR-3385 BMI-2103) / W.E. Vesely, T.C. Davis, R.S. Denning, N Saltos. U.S. Nuclear Regulatory Commission. – Washington, DC 20555, May 1986.
4. Application of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power plants (IAEA-TECDOC-1200) / International Atomic Energy Agency. – Vienna, February 2001.
5. Анализ возможности сокращения проектного количества средств непрерывного контроля концентрации борного раствора теплоносителя энергоблоков ЗАЭС / Отчет о НИР. Этап 1. – Одесса, 2003.
6. Соловьев В.Г., Колыханов В.Н., Комаров Ю.А., Скалозубов В.И. Возможность отказа от непрерывного контроля концентрации борной кислоты в системе гидроемкостей АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – 2002. – №4. – С. 66–70.
7. Павловский З. Введение в математическую статистику. – М.: Статистика, 1967.
8. Клемин А.И., Емельянов В.С., Морозов В.Б. Расчет надежности ядерных энергетических установок. Марковская модель. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 208 с.

MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMISATION OF CONTROL SYSTEM OF BORIC SOLUTION CONCENTRATION OF REACTOR FACILITIES' COOLANT

D.V. Biley*, V.G. Solovjov, Yu.A. Komarov***, V.I. Skalozubov*****

** National Atomic Energy Generating Company "Energoatom"*

*** Odessa State Ecological University*

**** Odessa branch of State Scientific and Technical Centre of Nuclear and Radiation Safety*

E-mail: gntcod@te.net.ua

This paper represents the mathematical model, which one is a core of a designed technique of the monitoring cooling boric solution concentration system optimization of reactor installations (CBC RI). Risk inform decision making and probabilistic approaches of reliability simulation of CBC RI measurement system are basis of model. By basis of operation data base (flow diagrams of the equipment installation; statistics of failures and defects of the equipment of the boron concentration control sensors (NAS-B), valves installation; the change boron concentration data in points of the control) and designed mathematical model would be possible to evaluated / justified a capability of elimination of the control concentration system and to determine change of periodicity sample cutting for assurance irreducible of control system reliability. The technique application allows justify a capability of design quantity reduction of NAS-B sensors.

KEY WORDS: reliability, monitoring, concentration, measurement, coolant, boric solution, NAS-B, reactor.