

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ЗАПРОЕКТНЫМИ АВАРИЯМИ НА АЭС С ВВЭР

Ю. Л. Коврижкин¹, Н. И. Власенко¹, С. Л. Волошина², А. А. Ключников²,
В. И. Скалозубов²

¹НАЭК «Энергоатом», Киев

²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины Киев

Проведен анализ известных подходов и предложены методические основы по разработке и применению руководств управления запроектными авариями на АЭС с ВВЭР.

Общие положения

Концепция запроектных аварий отражена в [1], а в [2, 3] она дополняется некоторыми более конкретными требованиями (в России, кроме того [4, 5]). В основном эти требования совпадают с рекомендациями МАГАТЭ [6]. Концепция строится на требовании ограничивать радиационное воздействие при запроектных авариях за счет применения мер по управлению авариями и осуществления на площадке АЭС и окружающей местности планов мероприятий по защите персонала и населения.

Первая редакция действующего руководства по управлению запроектными авариями (РУЗА) АЭС с ВВЭР была разработана в Советском Союзе в 80-е годы. С тех пор редакция претерпела незначительные изменения и морально устарела. Анализ действующих в настоящее время РУЗА энергоблоков АЭС Украины с ВВЭР-1000 [8, 9, 12, 13] позволяет отметить следующее:

1. Все РУЗА используют в своей основе событийно-ориентированный подход (СБОАИ) управления авариями, при котором действия операторов (алгоритмы управления запроектными авариями - АУЗА) определены для конкретного исходного события (ИС)/группы событий. Применение такого подхода целесообразно только при условии достаточных для идентификации всего спектра исходных аварийных событий систем контроля/диагностики и/или универсальных для ИС/группы ИС признаков (симптомов) возникновения запроектной аварии по отклонениям технологических параметров и срабатываниям уставок защит. Существующие РУЗА не определяют в полной мере эти условия для идентификации исходных аварийных событий и выбора соответствующего алгоритма УЗА. Так, для примера, в РУЗА [8] запроектные аварии с малой и средней течью 1-го контура имеют одинаковые признаки возникновения исходного события.

2. РУЗА отличаются полнотой перечня исходных событий запроектных аварий. Во всех РУЗА этот перечень не является исчерпывающим, в том числе и в отношении доминантных для безопасности аварийных последовательностей. Необходимо существенное уточнение перечня запроектных аварий, которое возможно на основе полученных в последнее время результатов углубленного анализа безопасности АЭС с ВВЭР.

3. В большинстве случаев представленные в РУЗА алгоритмы действий по управлению авариями не являются обобщенными (единиными) для конкретных исходных событий - ИС/групп ИС, так как не учитываются все возможные отказы в процессе развития исходного аварийного развития. Не определены в полной мере способы и методы контроля этих отказов, а также алгоритмы управления аварийными последовательностями. Так, например, возможный для большинства ИС отказ на срабатывание аварийной защиты (АЗ) для аварийного останова реактора представлен в известных РУЗА отдельным алгоритмом, который не является в общем случае универсальным для других ИС/групп ИС.

В рамках используемого в РУЗА СБОАИ необходима дальнейшая разработка обобщенных для ИС алгоритмов управления с учетом:

всех возможных аварийных последовательностей, связанных с отказами критических конфигураций систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности; всех возможностей восстановления и дублирования отказавших критических конфигураций систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности; времени, располагаемым оператором для управления аварийными процессами, в том числе и по восстановлению/дублированию отказавших систем.

4. Управление авариями предполагает не только регламентирование действий оператора, но и принятие дополнительных технических мероприятий по контролю, восстановлению/дублированию систем, обеспечивающих выполнение необходимых функций безопасности. Во всех известных РУЗА такие мероприятия рассмотрены крайне недостаточно.

В настоящее время в национальную практику происходит внедрение углубленного анализа безопасности и риск-ориентированных подходов, использование которых совместно с детерминистскими методами позволяет обеспечить принятие более обоснованных/сбалансированных решений по вопросам безопасности АЭС, сфокусировать внимание на тех проблемах, которые связаны с наибольшим риском для безопасности. Эти подходы определены новыми нормативными требованиями [1] для формирования окончательных перечней и реалистических сценариев развития запроектных аварий и поэтому должны быть учтены при разработке новой редакции РУЗА. Кроме того, методы углубленного анализа безопасности и риск-ориентированных подходов могут служить основой для развития методического обеспечения РУЗА. Необходимо также внедрение в РУЗА более перспективных симптомно-ориентированных подходов (СОАИ) УЗА, основанных на разработке универсальных признаков (симптомов) возникновения аварий.

Учитывая достаточную общность и отсутствие конкретизаций требований нормативных документов по отношению к управлению запроектными авариями (УЗА), в НТЦ ЯРБ (Россия) в 1991 - 1996 гг. была выполнена разработка проекта соответствующего руководства по безопасности, который на уровне рекомендаций конкретизировал бы общие нормативные требования, содержащиеся в документах более высоких уровней, и определил бы недостающие требования в отношении методики разработки технических и организационных мер по УЗА. Разработанный проект содержит рекомендации по обеспечению готовности на случай запроектной аварии [7]: разработка мер по УЗА; разработка организационной структуры для УЗА; разработка РУЗА; организация обучения персонала АЭС и привлеченных лиц; корректировка РУЗА. Разработанный проект подвергся критике специалистов за чрезмерную общность содержащихся в нем рекомендаций. В частности, эта критика касалась приведенной методики перехода от набора представительных сценариев аварий к уровням их тяжести и обеспечения, тем самым ориентации разрабатываемых мер по УЗА на признаки состояния аварийного энергоблока. Недостаток отечественного опыта разработок в данной области не позволил сделать рекомендации, содержащиеся в разработанном проекте документа руководства по безопасности, достаточно конкретными и, прежде всего, в методическом плане. В нем в определенной степени сохранилась обобщенность формулировок, характерная, например, для рекомендаций МАГАТЭ [6].

Кроме того, дополнительно можно высказать еще ряд следующих замечаний:

1. Фактически остался без рассмотрения ключевой (и наиболее сложный) вопрос применения СОАИ УЗА – методическое обеспечение к формированию обобщающих (огнивающих) симптомов, по которым формируется конкретные обобщающие алгоритмы восстановления или дублирования «потерянных» критических функций безопасности.

2. Принятие допущения о том, что «уровень тяжести» ограниченного количества в процессе аварии состояний не зависит от пути (сценариев) развития аварийных последовательностей, в общем случае является не вполне корректным.

Попытки усовершенствования методической основы СОАИ руководств по безопасности были рассмотрены в работах [14, 15], в которых представлен оригинальный метод постулируемых уровней тяжести аварий. Этот метод позволяет на основе систематического

рассмотрения различных реализуемых сочетаний повреждения физических барьеров на пути распространения радиоактивных продуктов в окружающую среду выбрать из практически неограниченного числа вариантов протекания (сценариев) запроектных аварий конечное и обозримое количество сценариев, представительных в смысле полноты охвата возможных аварийных состояний энергоблока АЭС. Метод реализован, в частности, применительно к СОАИ энергоблоков Ленинградской АЭС (РБМК-1000) и Балаковской АЭС (ВВЭР-1000).

Отмечая целесообразность и перспективность этого метода, следует также отметить вопросы, требующие доработок, связанных с необходимостью достаточно обоснованного методического подхода формирования универсальных обобщающих симптомов и обобщающих алгоритмов действий по УЗА.

Основы методического обеспечения

Основой методического обеспечения управления запроектными авариями является принцип идентификации исходных событий и/или признаков (симптомов) аварий по обобщенным алгоритмам управления аварийными процессами (*принцип идентификации по обобщенным ОАУЗА*).

Принципиальная структура подходов по УЗА приведена на рис. 1 и 2. В соответствии с принципом идентификации по ОАУЗА в рамках СБОАИ в обобщенную j-ю группу исходных событий должны входить отдельные события ИС_i, имеющие одинаковый алгоритм управления ОАУЗА как на проектной, так и на запроектной стадии развития аварии:

$$\overline{ИС}_j (ИС_i, i = 1, \dots, j) \Leftrightarrow ОАУЗА_j (idem АУЗА_i) \tag{1}$$

S/I	S ₁ /I ₁	S ₂ /I ₂	...	S _n /I _n
АУЗА ИС	ИС ₁	ИС ₂	...	ИС _n
АУЗА1	x			...
АУЗА2		x		
· · ·	· · ·	· · ·	x	
АУЗА _n				x

Рис. 1. Принципиальная структура СБОАИ: ИС – исходное событие;
S/I - идентификаторы исходного события;
АУЗА – алгоритмы управления запроектными авариями.

В соответствии с принципом идентификации по ОАУЗА в рамках СОАИ в обобщенную группу симптомов \overline{S}_j аварийных событий должны входить симптомы, содержание и последовательность которых однозначно определяют соответствующую группу событий, имеющих одинаковый алгоритм управления ОАУЗА_j как на проектной, так и на запроектной стадии развития аварии:

$$\overline{S}_j (\overline{ИС}_j) \Leftrightarrow ОАУЗА_j (idem АУЗА_i) \tag{2}$$

Условия (1) и (2) являются методической основой создания руководств (инструкций) по управлению запроектными авариями, которые сводятся к последовательному выполнению следующих этапов:

1. Идентификация групп исходных событий признаков (симптомов) и соответствующих им возможных последовательностей развития аварий (АП).

2. Определение критериев успеха состояний обобщенных аварийных последовательностей и допустимые интервалы времени, необходимые для выполнения, восстановления и/или дублирования необходимых функций безопасности.

3. Формализация обобщенных алгоритмов управления авариями для каждой группы исходных событий/признаков (симптомов) как на проектной, так и на запроектной стадиях развития аварийных процессов.

S АУЗА	S₁	S₂	...	S_n
АУЗА1	x		.	
АУЗА2		x	.	
.			.	
АУЗА _n			x	

Рис. 2. Принципиальная структура СОАИ.

Универсальность ОАУЗА определена предусмотренным проектом набором и последовательностью обеспечения необходимых функций безопасности. Частичное или полное необеспечение выполнения необходимых функций безопасности определяет развитие аварийного процесса на стадиях перехода проектных аварий в запроектные, а запроектные в тяжелые аварии. Функции безопасности, необеспечение выполнения которых приводит к переходу запроектных аварий в тяжелые аварии, являются критическими функциями безопасности (КФБ), а минимальные конфигурации систем, обеспечивающие выполнение КФБ, являются соответствующими критическими конфигурациями систем (ККС). КФБ и соответствующие ККС определяют конечный и общий спектр развития аварийных последовательностей, на основе которого возможно формирование ОАУЗА:

$$ОАУЗА_j \Leftrightarrow \{ КФБ_j(\overline{ИС}_j, \overline{S}_j) \} \quad (3)$$

Обобщенные $\overline{ИС}$ или \overline{S} по КФБ и ККС определяют как общий (универсальный) набор АП, которые могут привести запроектные аварии к тяжелым последствиям, так и соответствующие ОАУЗА. Для АП запроектными авариями, в которых не нарушено выполнение КФБ, применимы алгоритмы управления и ликвидации аварий на проектной стадии (например, [17]). Таким образом, при реализации принципа идентификации по ОАУЗА охватывается весь спектр возможных аварийных последовательностей. Такой подход принципиально отличается от известных предложений формирования РУЗА только для тех АП, которые вносят существенный вклад в показатели безопасности. Последний подход может быть неоправдан в отношении достаточности действий и мероприятий по управлению запроектными авариями, как одного из уровней глубоко эшелонированной защиты АЭС [1], так и в отношении снижения уровня безопасности без необходимых компенсирующих мероприятий [2].

Развитие АП при успешном выполнении всех ККС соответствующих КФБ можно условно определить как *границную запроектную аварию*. Границной запроектной аварией такая АП является потому, что в ККС учитываются минимальные наборы каналов/оборудования, обеспечивающие выполнение КФБ, т.е. допускаются отказы сверх принципа единичного отказа, определенного для проектных аварий [1]. При работоспособных конфигурациях систем больше, чем минимальные наборы ККС, АП запроектных аварий также должны иметь безопасные конечные состояния вплоть до условий развития АП

проектных аварий. В этом случае управление запроектных аварий (включая граничную запроектную аварию) сводится к обеспечению и контролю работоспособности минимальных конфигураций систем, которые в свою очередь обеспечивают выполнение КФБ.

При формировании наборов и последовательностей симптомов исходных событий применяются: принцип минимальности и достаточности; принцип адекватности исходному событию.

Принцип минимальности и достаточности определяет необходимость применения минимального набора симптомов, достаточных для идентификации исходного аварийного события

$$\bar{S}_{ИС} \rightarrow \min (\bar{S}_1, \bar{S}_2) \quad (5)$$

Выполнение принципа минимальности и достаточности необходимо для упрощения, а соответственно, и повышения надежности действий оператора по идентификации исходных событий или по выбору алгоритмов управления аварией.

Принцип адекватности исходному событию определяет необходимость дополнительного условия по различию достаточных наборов и последовательностей симптомов между другими группами исходных событий.

Метод построения обобщенного алгоритма управления запроектными авариями основывается на результатах, полученных вышеприведенными методами идентификации исходных событий, симптомов и аварийных последовательностях при условии (3), согласно которым управление запроектными аварийными последовательностями, имеющими условия граничной запроектной последовательности с безопасным конечным состоянием, осуществляется алгоритмами при проектном протекании аварийных процессов. Для запроектных аварий с возможными тяжелыми последствиями *обобщенный алгоритм управления запроектными авариями (ОАУЗА)* для каждой группы исходных событий и/или симптомов исходных событий может быть определен по индивидуальному набору и последовательностей критических конфигураций систем, обеспечивающих выполнение, восстановление и дублирование критических функций безопасности.

Схематично обобщенный алгоритм управления запроектными авариями представлен на рис. 3. Реализация ОАУЗА осуществляется поэтапно.

Этап 1. На начальном этапе оператор по контролируемым признакам или прямым методам измерений идентифицирует:

принадлежность события к обобщенным симптомам исходных событий, имеющих общий алгоритм управления аварией (в рамках СОАИ);

принадлежность события к обобщенным группам исходных аварийных событий, имеющих общий алгоритм управления аварией (в рамках СБОАИ).

По результатам идентификации исходных событий и их симптомов определяется соответствующий индивидуальный алгоритм управления аварией.

Этап 2. Далее оператор осуществляет контроль выполнения функций безопасности и управление аварий в проектном режиме.

Этап 3. В случае невыполнения условий развития проектной аварии возникают условия запроектной аварии и на этом этапе оператор осуществляет контроль выполнения критических функций безопасности соответствующими конфигурациями систем, обеспечивающих их выполнение. В случае успешного выполнения КФБ (вплоть до минимальных конфигураций систем, обеспечивающих их выполнение) дальнейшее управление аварией осуществляется в проектном режиме.

Этап 4. В случае отказа на любом этапе развития аварийного процесса системы по обеспечению соответствующей КФБ, возникает два одновременных этапа дальнейшего управления аварией: восстановление работоспособности каналов системы (этап 4а) и дублирование выполнения КФБ другими системами безопасности (этап 4б). Восстановление работоспособности системы может осуществляться как периодическим повторением включе-

ния отказавших каналов системы, так и диагностикой и устранением причин отказов. Дублирование выполнения КФБ должно осуществляться, в первую очередь, другими системами, обеспечивающими по проекту выполнение аналогичных функций безопасности. В случае если по технологическим причинам невозможно одновременное управление аварией по восстановлению отказавших каналов системы и по дублированию выполнения КФБ другими системами, то приоритет отдается действиям по дублированию.

Этап 5. В случае невыполнения успешных действий по дублированию и по восстановлению выполнения КФБ за время, отведенное для осуществления этих действий, возникают условия тяжелой аварии. Дальнейшие мероприятия должны осуществляться либо в соответствии с руководством по управлению тяжелыми авариями (РУТА), либо планами чрезвычайных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *НП 306.1/1.034-2000* Общие положения обеспечения безопасности атомных станций / ГКЯРУ. – Киев, 2000.
2. *Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89)*, 1991.
3. *Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности*. НП-010-98, 1991.
4. *Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности атомной станции с реактором типа ВВЭР (ТС ООБ), ПНАЭ Г-01-036-95*, 1995.
5. *Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности*, ПНАЭ Г-03-33-93, 1993.
6. *International Atomic Energy Agency, Accident Management Programs in Nuclear Power Plants. A Guidebook. Technical Report Series № 368*, Vienna, 1994.
7. *Антропов В.Н., Букринский А.М., Кузнецов М.В.* О необходимости разработки рекомендаций к составлению руководства по управлению запроектными авариями на АС / НТЦ ЯРБ Госатомнадзора РФ. – М., 2000.
8. *Руководство по управлению запроектными авариями энергоблоков ЗАЭС // 00.ГТ.Рг.04 А*, 1998.
9. *Руководство по управлению запроектными авариями на энергоблоке № 1 Хмельницкой АЭС / Госкоматом Украины – 1.ЯБ 1273.ИЭ-97.*
10. *Руководящий документ «Требования к содержанию отчета по анализу безопасности действующих энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР»*, введен в действие приказом Госкоматома Украины от 27.11.95 № 386.
11. *Руководящий нормативный документ «Требования к содержанию отчета по анализу безопасности АС с реакторами типа ВВЭР на стадии выдачи разрешения на ввод в эксплуатацию*. КНД 306.302-96.
12. *Руководство по управлению запроектными авариями на энергоблоках №1 и 2 Южно-Украинской АЭС*. 1.1-209В27, г. Южно-Украинск, 1994.
13. *Министерство энергетики Украины. НАЭК "Энергоатом". Ровенская АЭС. №3-Э-УНИК. Руководство по управлению запроектными авариями на энергоблоке №3 Ровенской АЭС*. г. Кузнецовск, 1995/1998.
14. *Bukrinsky A., Development of Deterministic Approach to the Beyond Design Basis Accident Management in Application to NPP units with WWER-1000. SAM-99 Information Exchange Forum on "Severe Accident Management"*, 18 - 22 October 1999, Obninsk, Russia.
15. *Antropov V., Bukrinsky A., Shvyryaev Yu., Development of Methodology and List of BDPA for WWER-1000 for Quantitative Analysis. SAM-99 Information Exchange Forum on "Severe Accident Management"*, 18 - 22 October 1999, Obninsk, Russia.
16. *International Nuclear Safety Program. Soviet – Designed Pressurized Water Reactor Symptomatic Emergency Operating Instruction Analytical Validation Procedure // Ronald J. Beclman – Idaho 83401 – USA – 2000.*
17. *Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на РУ энергоблока № 4 Ровенской АЭС с реактором ВВЭР-1000 / 5-Э-УНИК-ГП НАЭК «Энергоатом»*, 2003.
18. *НП 306.2.106-2005* Требования к проведению модификаций ядерных установок и порядку оценки их безопасности / ГКЯР Украины, 2005.

Поступила в редакцию 03.12.07

4 ОСНОВИ КЕРУВАННЯ ЗАПРОЕКТНИМИ АВАРІЯМИ НА АЕС ІЗ ВВЕР

Ю. Л. Коврижкін, М. І. Власенко, С. Л. Волошина, О. О. Ключников, В. І. Скалозубов

Проведено аналіз відомих підходів і запропоновано методичні основи по розробці та застосуванню настанов щодо керування запроектованими аваріями на АЕС із ВВЕР.

4 BASIS OF BEYOND DESIGN BASIS ACCIDENTS CONTROL AT NPP WITH VVER

Yu. L. Kovrigkin, N. I. Vlasenko, S. L. Voloshina, A. A. Kljuchnikov, V. I. Skalozubov

The known approaches on design basis accidents control at NPPs with VVER are analyzed and methodical bases on development and application of control guidance are offered in this paper.

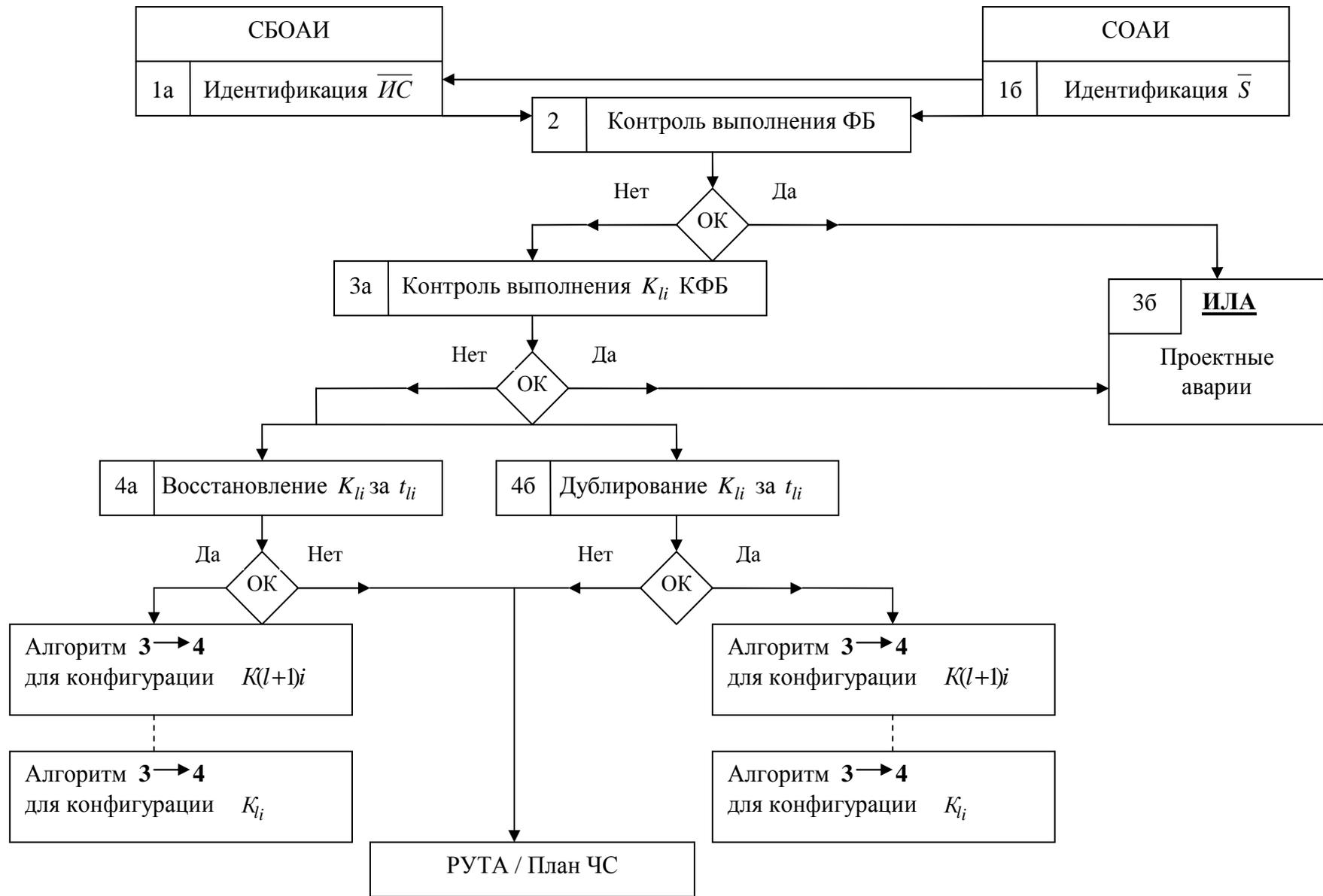


Рис. 3. Обобщенный алгоритм управления запроектными авариями

