

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)**

Кафедра №1
**Кафедра радиационной физики и безопасности атомных
технологий**

КУРТУЛУШ БЕЙЗА

*Выпускная квалификационная работа
специалиста
на тему:*

***Учет человеческого фактора в оценке надежности
ИРТ МИФИ***

Выпускная квалификационная
работа защищена

«__» _____ 2020г.

Оценка _____

Секретарь ГЭК _____

Москва 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)**

Кафедра №1
**Кафедра радиационной физики и безопасности атомных
технологий**

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ НА ТЕМУ:

***Учет человеческого фактора в оценке надежности
ИРТ МИФИ***

Выполнила: студентка группы С14-161 Куртулуш Бейза

_____ (подпись)

Руководитель проекта: доцент, к.ф.-м.н. Костерев В.В.

_____ (подпись)

Рецензент: с.н.с, Зубарев В.Н.

_____ (подпись)

И.О. Зав.кафедрой №1: доцент, к.ф.-м.н. Демин В.М.

_____ (подпись)

Москва 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Тема дипломной работы «Учет человеческого фактора в оценке надежности исследовательского реактора ИРТ МИФИ».

Дипломная работа состоит из: введения, двух глав, поделенных на параграфы, заключения и списка использованных источников.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, цель и задачи исследования.

В первой главе проведен анализ литературы для задач оценки надежности и риска, приведены основные характеристики ИРТ МИФИ. Выполнен обзор литературы по учету вклада человеческого фактора в отказы технических систем, выбран метод учета человеческого фактора.

Во второй главе построены деревья отказов для оценки вероятностей различных аварийных ситуаций ИРТ МИФИ с учетом вклада человеческого фактора. Проведена оценка вероятности максимальной проектной аварии (МПА) для ИРТ МИФИ. Проведены оценки вероятности МПА ИРТ МИФИ для различных вариаций внешних условий и сложности задачи с учетом возможного отказа системы аварийной защиты. Проведены анализ и сравнение результатов расчетов.

В заключении приведены основные выводы, полученные в результате работы.

Общий объем работы 34 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	1
Введение	2
Глава 1	3
1.1. Человеческий фактор	3
1.2. Описание реактора МИФИ	7
1.3. HEART. Методика расчета вероятности ошибки человека	10
Глава 2	13
2.1. Дерево отказов	13
2.2. Вероятностный подход	15
2.3. Оценка возможных внеплановых остановов ИРТ МИФИ с использованием вероятностного подхода	16
Выводы	33
Список литературы	34

ВВЕДЕНИЕ

Опыт всех сфер человеческой деятельности свидетельствует о том, что человеческий фактор играет существенную роль в обеспечении безопасности. Например, в химической промышленности до 90% аварий связаны с ошибками персонала, в авиации до 80% аварий происходит по вине человека. На атомных электростанциях (АЭС) от 15 до 40 % всех аварий и от 20 до 80% всех нарушений случаются вследствие ошибок оператора-человека.

В настоящее время общепризнанно, что как на крупных АЭС, так и на относительно малых по мощности исследовательских ядерных установках (ИЯУ), оперативному персоналу (дежурная смена операторов и инженерно-технический персонал), непосредственно осуществляющему управление оборудованием, принадлежит главная роль при обеспечении безопасности. Именно поэтому важно учитывать человеческий фактор при оценке риска и надежности установки.

ГЛАВА 1

1.1. Человеческий фактор

Можно утверждать, что большинство известных крупных инцидентов, таких как Три-Майл-Айленд, Бхопал, Чернобыль, Зебрюгге и Клэпхем, связаны с взаимодействием сложных систем с людьми. Короче говоря, подразумевается, что человеческая ошибка была в большей или большей степени связана с этими и аналогичными инцидентами. В течение нескольких лет существовал интерес к моделированию этих факторов, чтобы количественные оценки надежности и риска могли учитывать вклад человеческой ошибки в отказ системы.

В настоящее время существует несколько моделей, каждая из которых разработана отдельными группами аналитиков, работающих в этой области. При наличии нескольких моделей для количественной оценки события возникает необходимость сравнить их и решить, какая из них наиболее подходит для поставленной задачи. Факторами для сравнения могут быть:

- *Точность* - Существуют трудности при отсутствии подходящих данных для сравнения и проверки.
- *Согласованность* - между разными аналитиками, изучающими один и тот же сценарий.
- *Полезность* - в определении факторов, которые необходимо изменить, чтобы уменьшить вероятность ошибок человека.
- *Ресурсы* - Необходимы для реализации исследования.

Следующее описание трех доступных моделей даст некоторое представление о подходе. [1]

1.1.1. HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) (Техника оценки и уменьшения человеческих ошибок) [1]

Это детерминированный и довольно простой метод, разработанный Дж. К. Уильямсом в начале 1980-х годов. Он включает в себя выбор вероятности человеческой ошибки из таблицы коэффициентов ошибок, а затем ее изменение с помощью коэффициентов умножения, определенных из таблицы условий возникновения ошибок. Считается, что он особенно полезен во время проектирования, так как он определяет условия возникновения ошибок и, следовательно, способствует улучшению. Это быстрый и гибкий метод, требующий мало ресурсов. Таблица коэффициентов ошибок содержит девять основных типов ошибок. Это:

Общая задача	Вероятность ошибки
Полностью неизвестное, выполняемое на скорость, с непонятными последствиями	0,55
Изменение/ возраст в исходное состояние системы в новое/начальное состояние с одной попытки без контроля за процедурой	0,26
Трудное задание, требующее высокого уровня понимания и мастерства	0,16
Довольно простое задание, выполняемое быстро или требующее мало внимания	0,09
Рутинная, хорошо отработанная быстрая процедура, включающая относительно низкий уровень мастерства	0,02
восстановление или изменение системы до начального или нового состояния в соответствии с процедурой	0,003
Полностью знакомое, хорошо продуманное, рутинное задание, выполняемое несколько раз в час в соответствии с высочайшими стандартами, выполняемое высоко мотивированными, высококвалифицированными и тренированными людьми, полностью осведомленными о последствиях отказа, с наличием времени для исправления потенциальной ошибки, но без преимуществ от значительных вспомогательных средств	0,0004
Корректное реагирование на команду системы даже в случае наличия дополнительная или автоматизированная контролирующая система, обеспечивающая точную интерпретацию состояния системы	0,000002
Различные задачи, для которых отсутствуют описания	0,03

Затем процедура описывает 38 «ошибок», каждому из которых присваивается максимальный множитель. Любое их число может быть выбрано и, в свою очередь, умножено на число от 0 до 1, чтобы принять во внимание оценку аналитиком того, какую долю максимума использовать. Модифицированные множители затем используются для изменения вышеуказанной вероятности. Примеры:

Состояние, вызывающее ошибки EPC (Error-producing condition)	Максимальный множитель
Незнаком с нечастой и важной ситуацией	x17
Нехватка времени для обнаружения ошибок	x11
Нет очевидных способов отменить непреднамеренное действие	x8
Нужно выучить противоположную философию	x6
Несоответствие между реальной и воспринимаемой задачей	x4
Новый квалифицированный оператор	x3
Мало или нет независимых проверок	x3
Стимул использовать более опасные процедуры	x2
Ненадежные приборы	x1,6
Эмоциональный стресс	x1,3
Низкий моральный дух	x1,2
Несовместимые дисплеи и процедуры	x1,2
Нарушение циклов сна	x1,1

Для каждого условия аналитик назначает «пропорцию эффекта» от суждения (в диапазоне 0-1).

Затем таблица составляется с использованием расчета:

$$[(EPC-1) \times (Proportion)] + 1$$

1.1.2. THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) (методика прогнозирования частоты ошибок человека) [1]

Это было разработано А. Д. Суэйном и Х. Э. Гутманом и широко используется. Полная процедура охватывает определение сбоев системы, представляющих интерес, посредством оценки частоты ошибок, чтобы рекомендовать изменения для улучшения системы. Аналитик должен разбить каждую задачу на этапы, а затем определить каждую возможную ошибку. Ошибки делятся на типы следующим образом:

- Пропуск шага или целого задания
- Выбирает неправильную команду или элемент управления
- Неправильно позиционирует элемент управления
- Неправильная последовательность действий
- Неправильное время (рано / поздно)
- Неправильное количество

Последовательность шагов представлена в дереве, так что вероятности ошибок могут быть умножены по путям для конкретного результата.

Еще раз (как и в случае с HEART), есть таблица вероятностей ошибок, из которой получены базовые коэффициенты ошибок для задач. Затем они модифицируются с помощью «параметров формирования», которые учитывают стресс, опыт и другие факторы, которые, как известно, влияют на коэффициенты ошибок.

Анализ учитывает зависимость шага от других шагов. Другими словами, неудача конкретного действия (шага) может изменить вероятность ошибки последующего шага.

1.1.3. TESEO (Empirical Technique To Estimate Operator Errors) (эмпирическая методика оценки ошибок оператора) [1]

Это было разработано Дж. К. Беллоу и В. Коломбари из анализа доступных литературных источников в 1980 году. Он применяется к ситуации оператора управления установкой и включает в себя легко применяемую модель, в соответствии с которой для каждой задачи определяются действующие факторы, а вероятность ошибки получается путем умножения пяти факторов следующим образом:

Деятельность

- Просто 0,001
- Требуется внимания 0,01
- Не рутина 0,1

Время стресса (в секундах)

- 2 (рутина), 3 (не рутина) 10
- 10 (рутина), 30 (не рутина) 1
- 20 (рутина) 0,5
- 45 (нестандартно) 0,3
- 60 (нестандартно) 0,1

Оператор

- Эксперт 0,5
- Средний 1
- Плохо Обучен 3

Тревожность

- Чрезвычайная Ситуация 3
- Потенциальная Чрезвычайная Ситуация 2
- Обычный 1

Эргономичный (т.е. Межпоселковый завод)

- Отлично 0,7
- Хороший 1
- Средний 3-7
- Очень бедный 10

Другие методы

Есть много других методов, таких как: [1]

- SLIM (метод индекса вероятности успеха)
- APJ (суждение об абсолютной вероятности)
- Парные сравнения
- MAP (подход диаграммы влияния)
- HCR (корреляция когнитивной надежности человека)

1.2. Описание Реактора МИФИ

1.2.1. Общее Описание Реактора

Реактор ИРТ Атомного центра МИФИ (ИРТ МИФИ), сооруженный по типовому проекту ТП-3304М, относится к универсальным исследовательским ядерным реакторам средней мощности. ИРТ МИФИ является гетерогенным водо-водяным на тепловых нейтронах реактором бассейнового типа со стационарным потоком нейтронов. В реакторе используются тепловыделяющие сборки (ТВС) ИРТ-2М и ИРТ-3М, широко применяемые в реакторах типа ИРТ и ВВР-СМ.

ИРТ МИФИ предназначен для проведения научноисследовательских и учебных работ по направлениям:

- физика и техника реакторов;
- ядерная физика;
- физика твердого тела;
- радиационная физика;
- радиационное материаловедение;
- нейтронно-активационный анализ;
- радиобиология;
- подготовка и переподготовка студентов и специалистов для ведущих научных центров.

Основные параметры ИРТ МИФИ приведены в таблице 1.1.

Активная зона реактора ИРТ МИФИ имеет следующие типовые нейтронно-физические характеристики:

- время жизни нейтронов оценивается величиной от 30 до 60 мкс;
- температурный коэффициент реактивности в интервале температур от 35 до 45 °С $\alpha_T = - (1,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-2} \beta_{эф} / K$;
- мощностной коэффициент реактивности $\alpha_N = - 5,1 \cdot 10^{-2} \beta_{эф} / MWt$.

Минимальные критические массы для ТВС ИРТ-2М по расчетным оценкам и экспериментальным результатам составляют:

- для загрузки с боковым бериллиевым отражателем – 1,3 кг U-235 (8 ТВС);
- для загрузки с водяным отражателем – 2,1 кг U-235 (12 ТВС).

Таблица 1.1. Основные параметры ИРТ МИФИ [19]

Характеристика	Значение
Мощность реактора, МВт	2,5
Количество ТВС в реакторе для одной из загрузок, шт.:	16
8-трубные	6
6-трубные с каналом СУЗ	10
Поверхность теплоотдачи активной зоны, м ²	23,5
Масса урана-235 в загрузке, кг	3,0
Исполнительные органы СУЗ, шт.:	
аварийной защиты,	3
компенсирующие,	6
автоматического регулятора	1
Максимальная плотность теплового потока, кВт/м ²	280
Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны	2,2
Расход воды 1-го контура через теплообменники, т/ч	160
Перепад давления на активной зоне, мм.вод.ст.	900
Средняя скорость теплоносителя в зазорах ТВС, м/с:	
ТВС ИРТ-2М	1,4
ТВС ИРТ-3М	0,95
Температура воды на входе в активную зону, не более, °С	45
Максимальная расчетная температура стенки твэла без учета отклонений параметров, определяющих режим, °С	81
Расчетная температура начала кипения в наиболее напряженной точке, °С	126
Максимальная плотность потока быстрых нейтронов ($E > 0,8$ МэВ) в активной зоне, нейтрон/(см ² ·с)	$4,5 \cdot 10^{13}$
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов, нейтрон/(см ² ·с):	
в активной зоне,	$4,5 \cdot 10^{13}$
в отражателе	$6,5 \cdot 10^{13}$

1.2.2. Режим Работы

Режим работы реактора определяется требованиями экспериментальных программ, реализуемых на нем в данный период времени. Как правило, реактор эксплуатируется недельными циклами до 100 часов с годовым временем работы на мощности до 2500 часов.

Запас реактивности и суммарная эффективность органов компенсации реактивности обеспечивают возможность эксплуатации реактора без перегрузки ТВС до энерговыработки 140 МВт·сут. [19]

1.2.3. Общая Компоновка Основных Сооружений и Оборудования

В реакторный комплекс ИРТ МИФИ входят:

- здание реактора (здание № 17);
- здание станции спецводоочистки (здание № 32);
- две градирни вентиляторные двухсекционные;
- два подземных резервуара спецстоков реактора с камерой переключения;
- четыре подземных резервуара станции спецводоочистки с двумя камерами переключения.

Здание реактора МИФИ с санитарно-защитной территорией выделены в "защищенную зону" и оборудованы физическим барьером, двумя рубежами технических средств охраны и системой оптико-электронного охранного видеонаблюдения на базе современных микропроцессорных и вычислительных технических средств.

Здание ИРТ МИФИ состоит из трех основных объемов.

Физический зал пролетом 18 м и высотой до балок перекрытия 14,4 м представляет собой железобетонный каркас с самонесущими кирпичными стенами. Объем физического зала 6600 м³. В зале размещен массив биологической защиты с бассейном реактора. Зал обслуживается мостовым краном грузоподъемностью 5 т.

Лабораторная часть здания – четырёхэтажная с высотой этажа 3,9 м от пола до пола с несущими наружными кирпичными стенами и внутренним железобетонным каркасом.

Пристройки – одноэтажные высотой от пола до низа перекрытия 3,5 м с несущими наружными стенами.

На отметках ниже 0,0 расположены камеры фильтров спецвентиляции, кессоны теплообменников и ионообменных фильтров 1-го контура

На этажах здания расположены:

На первом – физический зал, насосная 1-го контура, венткамеры приточной и специальной вентиляции, горячая камера с операторской, аккумуляторная.

На втором – щитовая электроснабжения, шахта-хранилище отработавших ТВС, лабораторные помещения.

На третьем – пультовая реактора, верхняя площадка реактора, сухие сборки для хранения радиоактивных деталей и отработавших ТВС, лабораторные помещения.

На четвертом – помещения общеобменной вытяжной вентиляции, служебные помещения.

В одноэтажных пристройках здания размещены: санпропускники, тепловой узел, насосная 2-го контура (на отметке ниже 0,0), помещение для хранения "свежих" ТВС, лабораторные помещения.

Через здание проходит шахта специальной вентиляции, на которой смонтирована труба диаметром 0,6 м, имеющая устье на отметке +40 м.

Строительная кубатура здания составляет 16 тыс.м³, развернутая площадь этажей - 2,7 тыс.м².

По периметру физического зала на уровне 2-го и 3-го этажей сооружены металлические площадки (балконы) для размещения оборудования экспериментальных групп.

Контроль радиационной обстановки на прилегающей территории, в пределах территории МИФИ и в наблюдаемой зоне округа "Москворечье-Сабурово" регулярно осуществляется с помощью специально оборудованной автомашины и стационарных датчиков контроля гамма-излучения на территории института. При нормальных условиях работы реактора повышения радиационного фона по сравнению с естественным уровнем не наблюдается. Радиационный фон в течение многих лет наблюдения составляет от 0,05 до 0,2 мкЗв/ч (от 5 до 20 мкбэр/ч), концентрация аэрозолей менее $1,1 \cdot 10^{-4}$ Бк/л ($3 \cdot 10^{-15}$ Ки/л). [19]

1.3. HEART. Методика расчета вероятности ошибки человека

Метод HEART, который был получен из широкого спектра результатов в эргономике, предполагает, что любая прогнозируемая надежность выполнения задачи может быть изменена в зависимости от наличия так называемых условий поощрения ошибок (EPCs). EPCs - это состояние и важность различных факторов, которые определяют и влияют на выполнение задачи. Метод идентифицирует девять типовых

типов задач и предлагает номинальные значения ненадежности человека вместе с 17 EPCs, влияние которых на выполнение задачи считается имеющим максимальный эффект (Williams 1986). В методологии HEART частота отказов оценивается с использованием эмпирического выражения вида:

$$P = P_0 \left\{ \prod_i [(EPC_i - 1)Ap_i + 1] \right\}$$

где P-вероятность человеческой ошибки,

P_0 -номинальная человеческая ненадежность,

EPC_i – i-ое контекстное условие, способствующее ошибке,

Ap_i - оценка инженером пропорционального эффекта (от 0 до 1) для каждого EPC_i .

Табличные значения P_0 и EPC_i , приведенные в таблицах 1.2 и 1.3, полезны при определении интенсивности отказов. [20]

Таблица 1.2. Значение номинальной вероятности человеческой ошибки, P_0 . [20]

	Общая задача	P_0
A	Полностью неизвестное, выполняемое на скорость, с непонятными последствиями	0,55
B	Изменение/ возраст в исходное состояние системы в новое/начальное состояние с одной попытки без контроля за процедурой	0,26
C	Трудное задание, требующее высокого уровня понимания и мастерства	0,16
D	Довольно простое задание, выполняемое быстро или требующее мало внимания	0,09
E	Рутинная, хорошо отработанная быстрая процедура, включающая относительно низкий уровень мастерства	0,02
F	Восстановление или изменение системы до начального или нового состояния в соответствии с процедурой	0,003
G	Полностью знакомое, хорошо продуманное, рутинное задание, выполняемое несколько раз в час в соответствии с высочайшими стандартами, выполняемое высоко мотивированными, высококвалифицированными и тренированными людьми, полностью осведомленными о последствиях отказа, с наличием времени для исправления потенциальной ошибки, но без преимуществ от значительных вспомогательных средств	0,0004
H	Корректное реагирование на команду системы даже в случае наличия дополнительная или автоматизированная контролирующая система, обеспечивающая точную интерпретацию состояния системы	0,000002
M	Различные задачи, для которых отсутствуют описания	0,03

Таблица 1.3. Факторы, способствующие ошибкам, ЕРС. [20]

	Ошибка-создание условия (Error-promoting condition) ЕРС	Значение
1	Незнание в новой или редкой ситуации которая потенциально важна	17
2	Нехватка времени для обнаружения или исправления ошибки	11
3	Шумные / беспорядочные сигналы	10
4	Средство подавления или переопределения информации	9
5	Отсутствие средств передачи пространственной или функциональной информации оператору	9
6	Неудовлетворительный системный / пользовательский интерфейс	8
7	Нет очевидных средств отмены непреднамеренное действие	8
8	Информационная перегрузка	6
9	Методика обучения/ та, которая требует применения противоположного подхода	6
10	Перенос знаний с одного задания к другое	5
11	Неоднозначность требуемого стандарта производительности	5
12	Несогласованность между восприятием и фактическим риском	4
13	Слабая, неоднозначная или плохо подобранная обратная связь	4
14	Нет четкого / прямого / своевременного подтверждения предназначеного действия от системы	4
15	Неопытный (получивший квалификацию, но не эксперт)	3
16	Бедность инструкций или процедур	3
17	Незначительная или полное отсутствие независимой проверки или тестирования выходных данных	3

Техника HEART характеризуется простым и легким применением, но есть несколько ограничений. Например, ЭПК не являются полностью независимыми друг от друга; более того, использование метода крайне субъективно и в значительной степени зависит от опыта аналитика. Наконец, с качественной точки зрения ЭПК выводятся из полезного перечня факторов, которыми должны руководствоваться менеджеры по безопасности, однако численные значения являются содержательными, а предсказательное уравнение-эмпирическим.

Для учета вышеуказанных недостатков авторы предлагают модифицировать методику, используя понятие нечетких лингвистических выражений в представлении коэффициентов оценки пропорций, A_{pi} . Этот подход предлагается потому, что в модели HEART, среди прочих, этот параметр наиболее характеризуется субъективными и неточными коннотациями. [20]

ГЛАВА 2

2.1. Дерево Отказов

Дерево отказов - логическая диаграмма, связывающая причины и следствия с использованием булевой алгебры. При этом применяются логические символы и символы событий. Основные логические символы: «И» (\cap), который предполагает наличие (на входе) одновременно всех входящих событий для реализации события на выходе, и «ИЛИ» (\cup), предполагающий достаточность хотя бы одного события (на входе) для реализации события на выходе.

Полезность дерева отказов заключается в следующем:

- анализ сосредоточен на отыскании отказов;
- выявляются важные для отказов аспекты системы;
- обеспечивается графическое представление материала;
- появляется возможность проведения качественного и количественного анализа надежности системы;
- обеспечивается возможность сосредоточиться на конкретном отказе системы;
- появляется возможность глубокого проникновения в процесс работы системы.

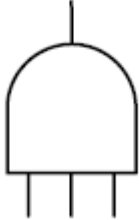
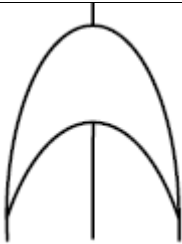
Знак «И»		Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
Знак «ИЛИ»		Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий

Рис. 1.1. Логические символы. [18]

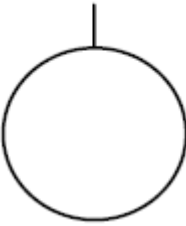
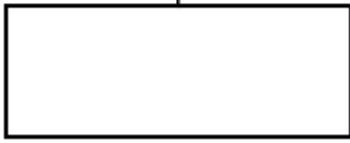
Круг		Исходное событие, обеспеченное достаточными данными
Прямоугольник		Событие, вводимое логическим элементом

Рис. 1.2. Символы событий. [18]

Нахождение аварийного события

Для анализа причинных связей в системе имеется два подхода: прямой анализ и анализ с обратным порядком. Анализ с прямым порядком начинается с определения перечня отказов и развивается в прямом направлении с определением последствий этих событий.

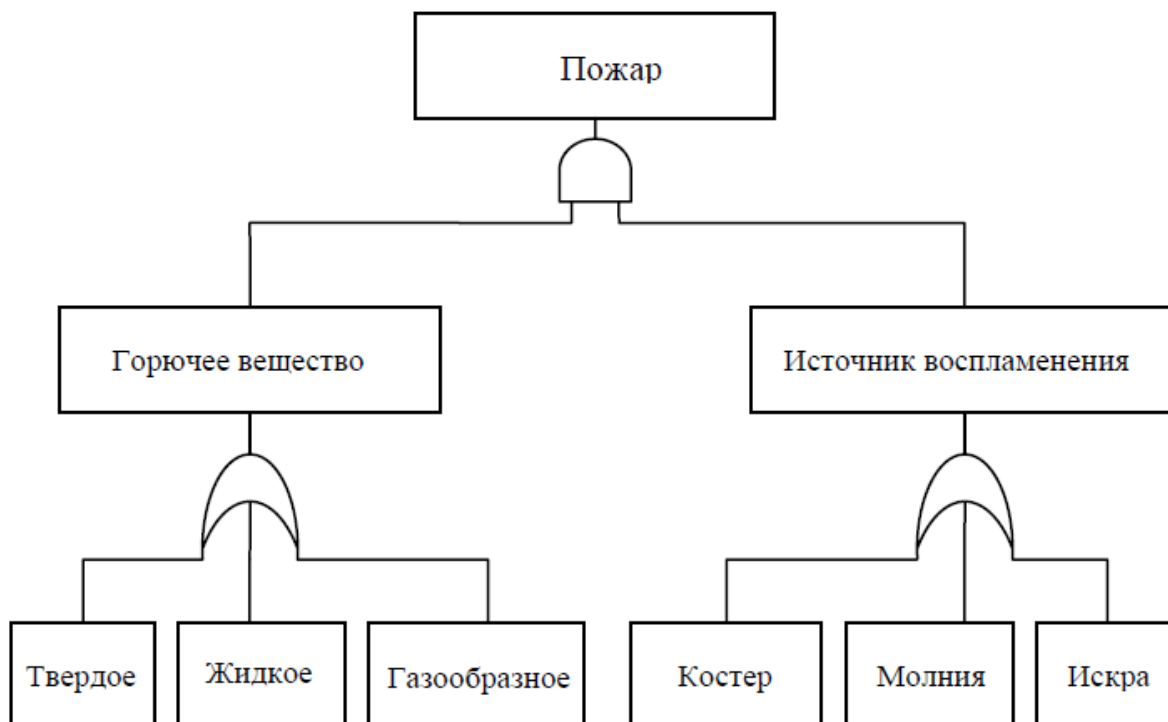


Рис. 1.3. Пример использования логических знаков «И» и «ИЛИ». [18]

2.2. Вероятностный Подход

Вероятностный анализ – формализованный метод анализа частоты отказов систем реактора, главным инструментом анализа является дерево отказов - логическая диаграмма, связывающая причины и следствия с использованием булевой алгебры. При этом применяются логические символы и символы событий. Основные логические символы: «И» (\cap), который предполагает наличие (на входе) одновременно всех входящих событий для реализации события на выходе, и «ИЛИ» (\cup), предполагающий достаточность хотя бы одного события (на входе) для реализации события на выходе. Пусть событие C случается, если появляются события A и B , тогда с использованием булевой алгебры $C=A \cap B$ есть пересечение событий. В терминах вероятностного подхода вероятность события C

$$P(C) = P(A) \cdot P(B/A),$$

где $P(A)$ -вероятность события A , $P(B/A)$ есть условная вероятность реализации события B при условии, что событие A произошло. В предположении независимости событий A и B

$$P(C) = P(A) \cdot P(B).$$

Если D случается, когда появляется A или B , тогда $D=A \cup B$ есть объединение событий. В терминах вероятностного подхода

$$P(D) = P(A) + P(B) - P(A \cap B).$$

Если события A и B независимы, вероятность $P(A \cap B)$ есть произведение вероятностей событий A и B , тогда формула преобразуется к виду

$$P(D) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B).$$

2.3. Оценка Возможных Внеплановых Остановов ИРТ МИФИ с Использованием Вероятностного Подхода

Зная частоты отказов элементов, проведём анализ различных сценариев аварий на реакторе.

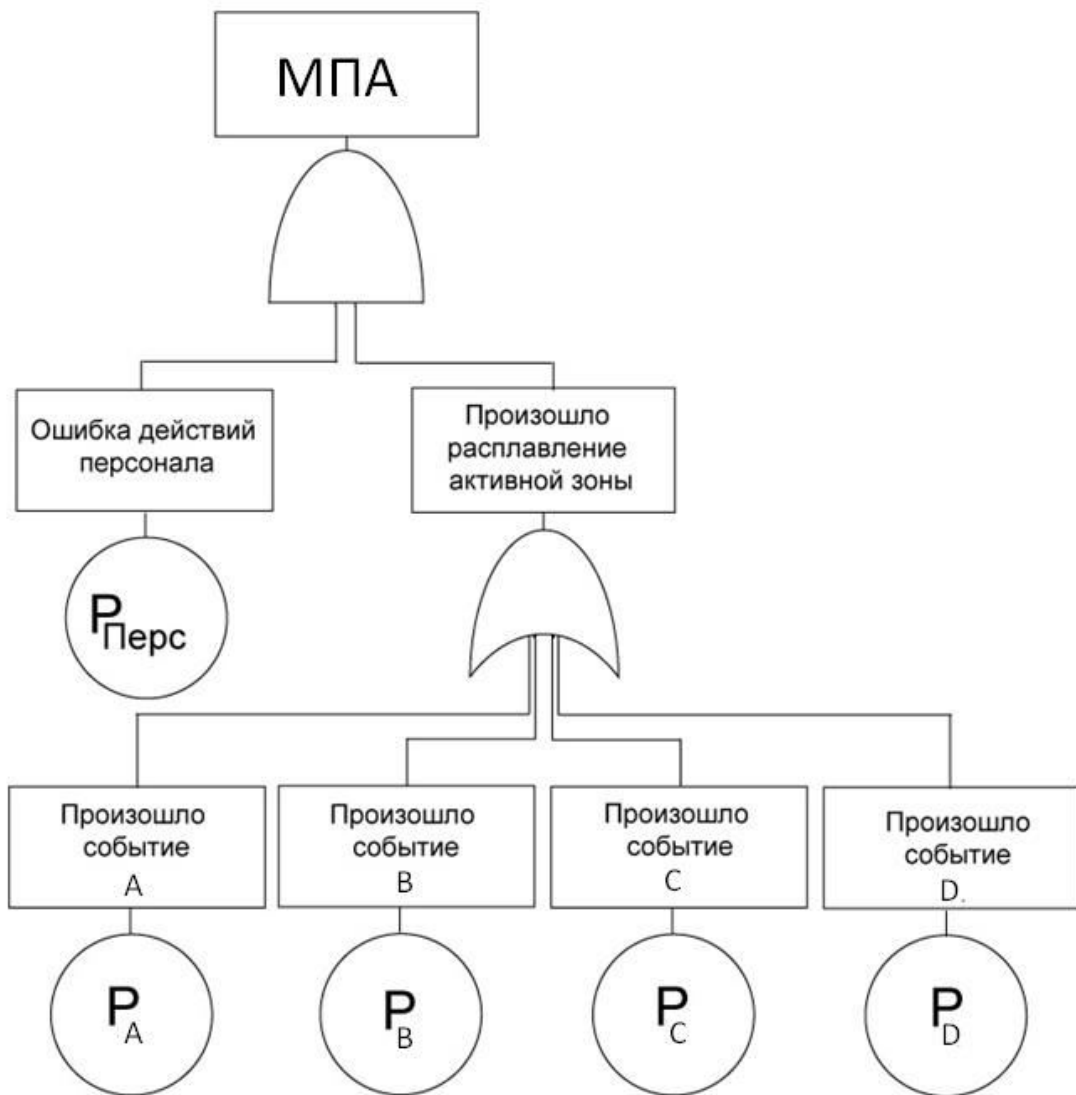
Список возможных исходных событий для ИРТ МИФИ включает: [19]

1. разгерметизацию тепловыделяющих сборок (ТВС);
2. сход ТВС со штанги;
3. отказ аварийной защиты (АЗ);
4. ошибку персонала;
5. извлечение и заклинивание системы управления защитой (СУЗ);
6. блокировку расхода теплоносителя через ТВС;
7. перекрытие сечения трубопровода 1-го контура;
8. остановку насосов 1-го контура;
9. сильную и слабую течь труб 1-го контура;
10. разгерметизацию обечайки тепловой колонны;
11. нарушение охлаждения со стороны 2-го контура;
12. попадание ионообменных смол в контур циркуляции;
13. выпадение ТВС из опорной решётки;
14. разгерметизацию горизонтального экспериментального канала (ГЭК);
15. разгерметизацию хранилища облученного топлива - ОТВС;
16. отказ СУЗ с УЗОР (системы управления и защиты с оптимальным регулятором);
17. затопление защитных элементов безопасности;
18. падение грузов на приемок сервоприводов СУЗ, в бассейне реактора, в шахту-хранилище;
19. максимальную проектную аварию.

Максимальная проектная авария (МПА)

В качестве МПА для ИРТ МИФИ установлено полное оплавление ТВС при блокировке проходного сечения для теплоносителя. Оплавление активной зоны может произойти при событиях:

- A. Повреждение топлива, возможно превышение допустимой мощности дозы для лиц категории А (ДМД(А))
- B. Разгерметизация ГЭК
- C. Снижение уровня воды в бассейне
- D. Нарушение охлаждения со стороны 2-го контура



Зная вероятности отказов элементов, проведём анализ этих сценариев аварии на реакторе.

Таблица 2.1. Из литературы [16] и [17] частоты сложных событий

Событие	Частота событий из [16], год ⁻¹	Частота событий из [17], год ⁻¹	Расчётные значения, год ⁻¹	Среднее геометрическое значение вероятности отказа, год ⁻¹	Консервативная оценка вероятности отказа, год ⁻¹
Отказ аварийной защиты (АЗ) (P _{АЗ})	10 ⁻¹	-	1,8 · 10 ⁻²	4,2 · 10 ⁻²	10 ⁻¹
Вероятность отключения электроэнергии: P _{Энерг}	3,2 · 10 ⁻⁴	-	-	3,2 · 10 ⁻⁴	3,2 · 10 ⁻⁴
Вероятность внутреннего отказа насоса 1-го контура: P _{Внутр.Отказ}	1,6 · 10 ⁻²	-	-	1,6 · 10 ⁻²	1,6 · 10 ⁻²
Вероятность отказа электро-коммутиционной аппаратуры: P _{Эл.Комм}	1,6 · 10 ⁻²	-	-	1,6 · 10 ⁻²	1,6 · 10 ⁻²
Остановка насосов 1-го контура: P _{Ост.Нас}	10 ⁻²	5 · 10 ⁻³	5,9 · 10 ⁻²	1,4 · 10 ⁻²	5,9 · 10 ⁻²
Разрыв трубопровода 1-го контура при эксплуатации: P _{Разр}	0,9 · 10 ⁻³	-	-	0,9 · 10 ⁻³	0,9 · 10 ⁻³
Дефект во фланцевых соединениях: P _{Фланц}	1,8 · 10 ⁻⁴	-	-	1,8 · 10 ⁻⁴	1,8 · 10 ⁻⁴
Дефект в сварных швах: P _{Швы}	4 · 10 ⁻⁸	-	-	4 · 10 ⁻⁸	4 · 10 ⁻⁸
Сильная течь труб 1-го контура: P _{Сильн}	-	-	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³
Протекание через сварные швы: P _{ШвыТеч}	1,8 · 10 ⁻⁴	-	-	1,8 · 10 ⁻⁴	1,8 · 10 ⁻⁴
Протекание теплоносителя через фланцевые соединения: P _{ФланцТеч}	10 ⁻⁴	-	-	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Слабая течь труб 1-го контура: P _{Слаб.Теч}	-	-	2,8 · 10 ⁻⁴	2,8 · 10 ⁻⁴	2,8 · 10 ⁻⁴
Разгерметизация обечайки из-за	0,9 · 10 ⁻⁴	-	-	0,9 · 10 ⁻⁴	0,9 · 10 ⁻⁴

внутренних дефектов: $P_{\text{Внутр.Деф}}$					
Разгерметизация обечайки из-за дефекта сварных швов: $P_{\text{Швы}}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	-	-	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Разгерметизация обечайки из-за коррозии: $P_{\text{Коррозия}}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$	-	-	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$
Разгерметизация обечайки из-за механического повреждения: $P_{\text{Мех.К}}$	10^{-6}	-	-	10^{-6}	10^{-6}
Разгерметизация обечайки тепловой колонны: $P_{\text{Разг.Обеч}}$	-	-	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Отказ оборудования 2-го контура контура: $P_{\text{О2к}}$	10^{-1}	-	-	10^{-1}	10^{-1}
Потеря электропитания насоса: $P_{\text{Эл.Пит}}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	-	-	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
Прекращение подпитки технической водой: $P_{\text{Тех.Вода}}$	10^{-4}	-	-	10^{-4}	10^{-4}
Нарушение охлаждения со стороны 2-го контура: $P_{\text{Наруш.Охл.2к}}$	-	-	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}
Локальное утоньшение стенки ГЭК: $P_{\text{Лок.ГЭК}}$	10^{-3}	-	-	10^{-3}	10^{-3}
Локальное утоньшение типа раковина стенки ГЭК: $P_{\text{Раковина.ГЭК}}$	10^{-4}	-	-	10^{-4}	10^{-4}
Общее утоньшение стенки ГЭК: $P_{\text{Общ.ГЭК}}$	10^{-4}	-	-	10^{-4}	10^{-4}
Повреждения стенки ГЭК при механическом воздействии: $P_{\text{Мех.ГЭК}}$	10^{-4}	-	-	10^{-4}	10^{-4}
Разгерметизация ГЭК: $P_{\text{Разг.ГЭК}}$	-	-	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

Попадание постороннего предмета в трубопровод 1-го контура: $P_{п.пред}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	-	-	$2,8 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
Внезапное закрытие запорной арматуры в трубопроводе 1-го контура: $P_{Закр.Арм}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	-	-	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$

Отказ аварийной защиты (АЗ) ($P_{АЗ}$)

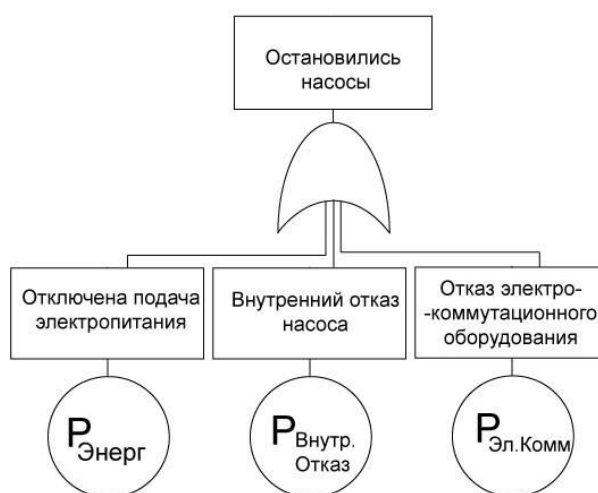
Общее число срабатываний АЗ - около $5 \cdot 10^3$. Соответственно, в среднем в год - 167.

Оценим вероятность отказа АЗ по формуле

$$P = 1 - \sqrt[n]{1 - \alpha} = 1 - \exp\left[\frac{\ln(1 - \alpha)}{n}\right] \approx -\frac{\ln(1 - \alpha)}{n} ; \alpha = 0,95 ; n = 167 :$$

$$P_{АЗ} = -\frac{\ln(1 - 0,95)}{167} = 1,8 \cdot 10^{-2}.$$

Остановка насосов 1-го контура ($P_{Ост.Нас}$)

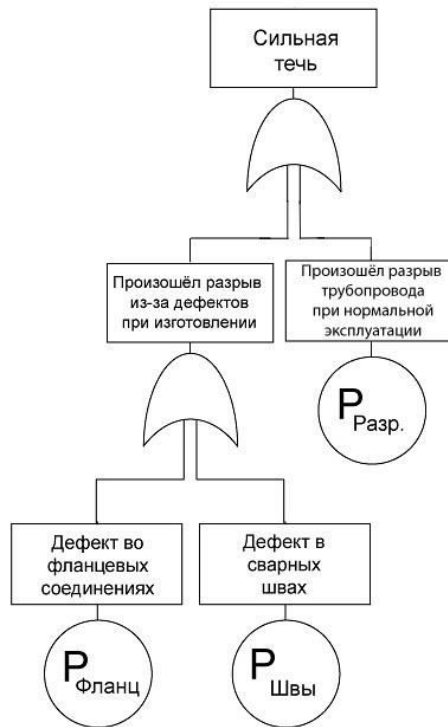


Расчёт по дереву отказов даёт значение для вероятности остановки насосов 1-го

контура: $P_{Ост.Нас} = P_{Энерг} + P_{Внутр.Отказ} + P_{Эл.Комм} - P_{Энерг} \cdot P_{Внутр.Отказ} - P_{Энерг} \cdot P_{Эл.Комм} - P_{Внутр.Отказ} \cdot$

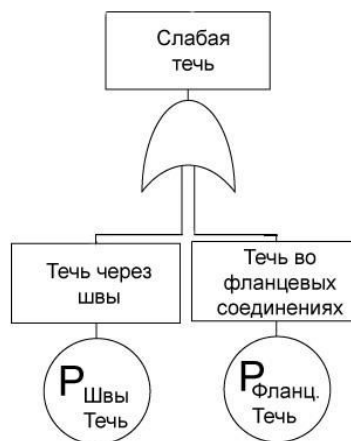
$P_{Эл.Комм} + P_{Эл.Комм} \cdot P_{Внутр.Отказ} \cdot P_{Энерг} = 5,9 \cdot 10^{-2}.$

Сильная течь труб 1-го контура ($P_{\text{Сильн}}$)



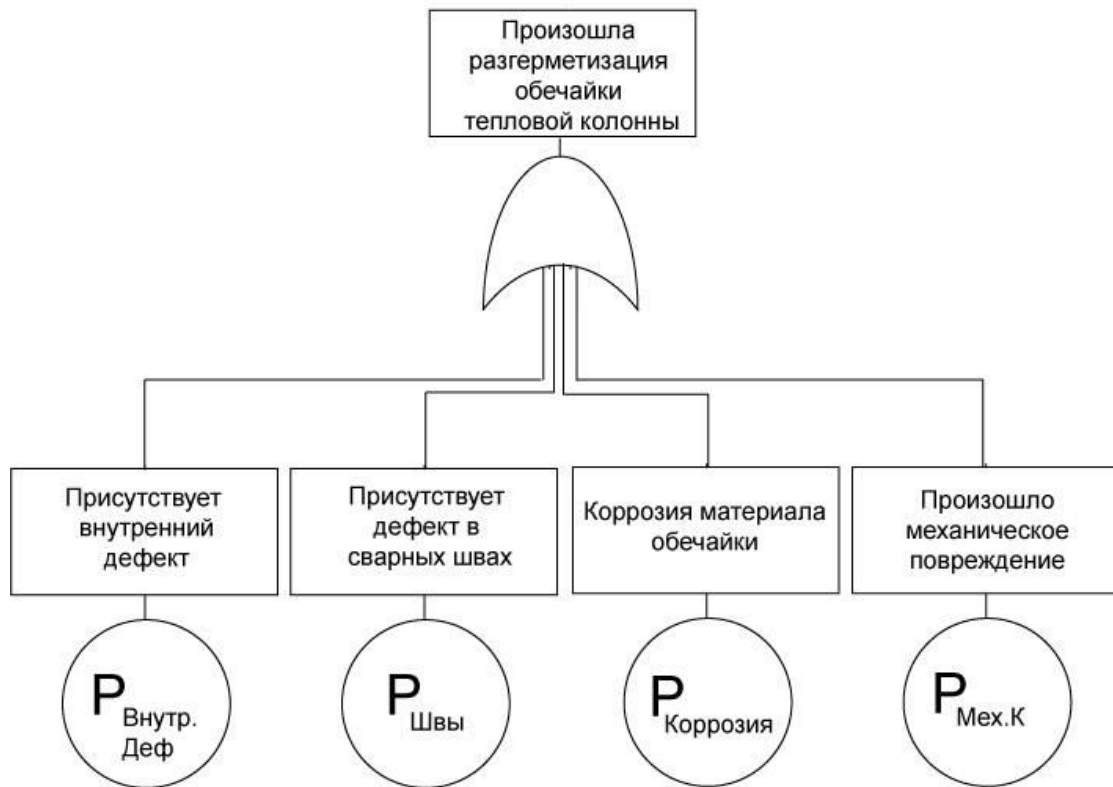
Расчёт по дереву отказов даёт значение для вероятности сильной течи трубопровода 1-го контура: $P_{\text{Сильн}} = (P_{\text{Фланц}} + P_{\text{Швы}} - P_{\text{Фланц}} \cdot P_{\text{Швы}}) + P_{\text{Разр}} - P_{\text{Разр}} \cdot (P_{\text{Фланц}} + P_{\text{Швы}} - P_{\text{Фланц}} \cdot P_{\text{Швы}}) = 10^{-3}$.

Слабая течь труб 1-го контура ($P_{\text{Слаб.Теч}}$).



Расчёт по дереву отказов даёт значение для вероятности слабой течи труб 1-го контура : $P_{\text{Слаб}} = P_{\text{ФланцТеч}} + P_{\text{ШвыТеч}} - P_{\text{ФланцТеч}} \cdot P_{\text{ШвыТеч}} = 2,8 \cdot 10^{-4}$.

Разгерметизация обечайки* тепловой колонны ($P_{\text{Разг.Обеч}}$)

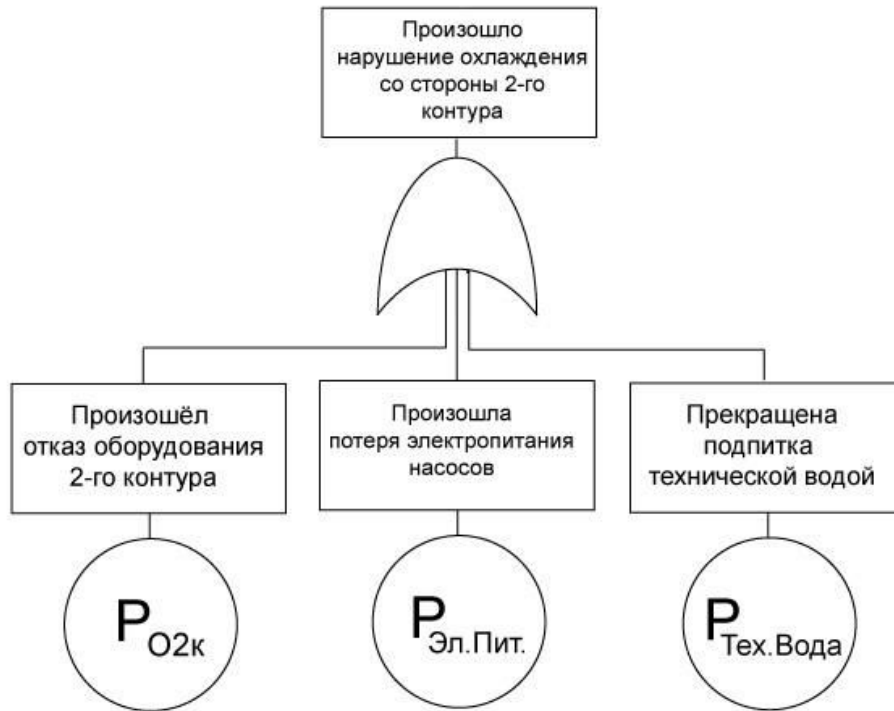


Расчёт по дереву отказов даёт значение для вероятности разгерметизации обечайки

тепловой колонны: $P_{\text{Разг.Обеч}} = (P_{\text{Внутр.Деф}} + P_{\text{Швы}} - P_{\text{Внутр.Деф}} \cdot P_{\text{Швы}}) + (P_{\text{Коррозия}} + P_{\text{Мех.К}} - P_{\text{Коррозия}} \cdot P_{\text{Мех.К}}) - (P_{\text{Внутр.Деф}} + P_{\text{Швы}} - P_{\text{Внутр.Деф}} \cdot P_{\text{Швы}}) \cdot (P_{\text{Коррозия}} + P_{\text{Мех.К}} - P_{\text{Коррозия}} \cdot P_{\text{Мех.К}}) = 3,3 \cdot 10^{-4}$.

*) Обечайка - открытый цилиндрический или конический элемент конструкции (типа обода или барабана, кольца, короткой трубы), используемый в изготовлении сварных или деревянных сосудов, резонаторов музыкальных инструментов, стенки люков и т. д.

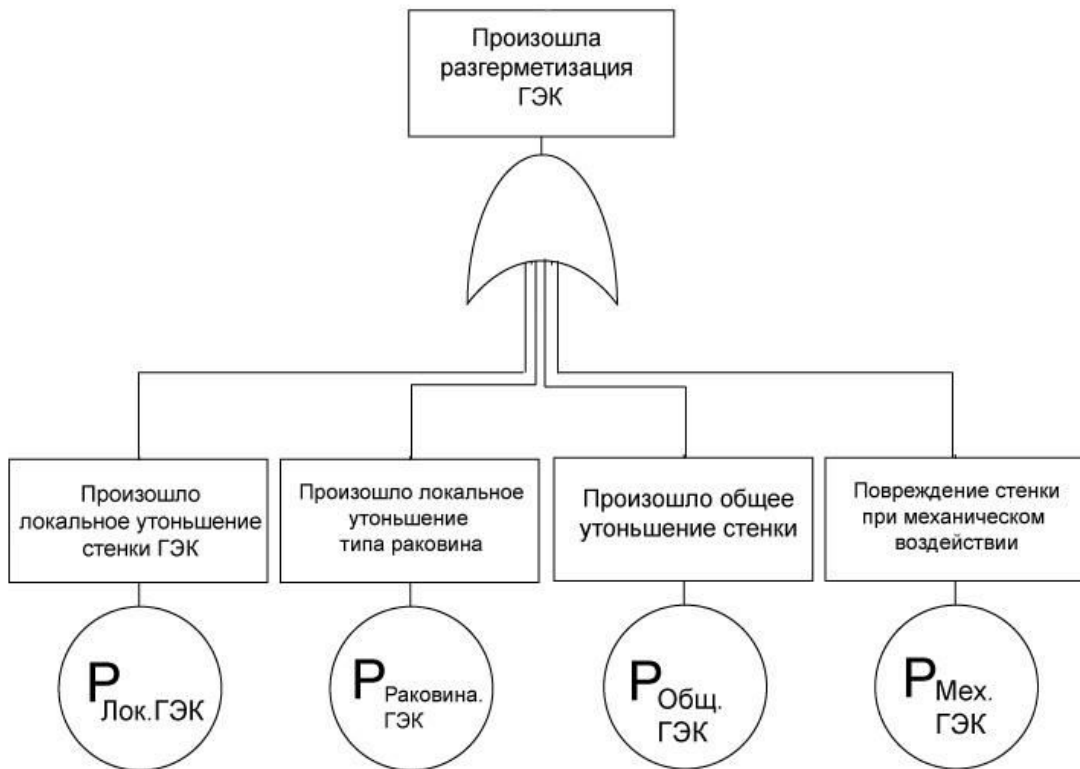
Нарушение охлаждения со стороны 2-го контура ($P_{\text{Наруш.Охл.2к}}$)



Расчёт по дереву отказов даёт значение для вероятности нарушения охлаждения со стороны 2-го контура:

$$P_{\text{Наруш.Охл.2к}} = P_{\text{Эл.Пит.}} + P_{\text{Тех.Вода}} + P_{\text{O2к}} - P_{\text{Эл.Пит.}} * P_{\text{Тех.Вода}} - P_{\text{Тех.Вода}} * P_{\text{O2к}} - P_{\text{O2к}} * P_{\text{Эл.Пит.}} + P_{\text{Эл.Пит.}} * P_{\text{Тех.Вода}} * P_{\text{O2к}} = 10^{-1}.$$

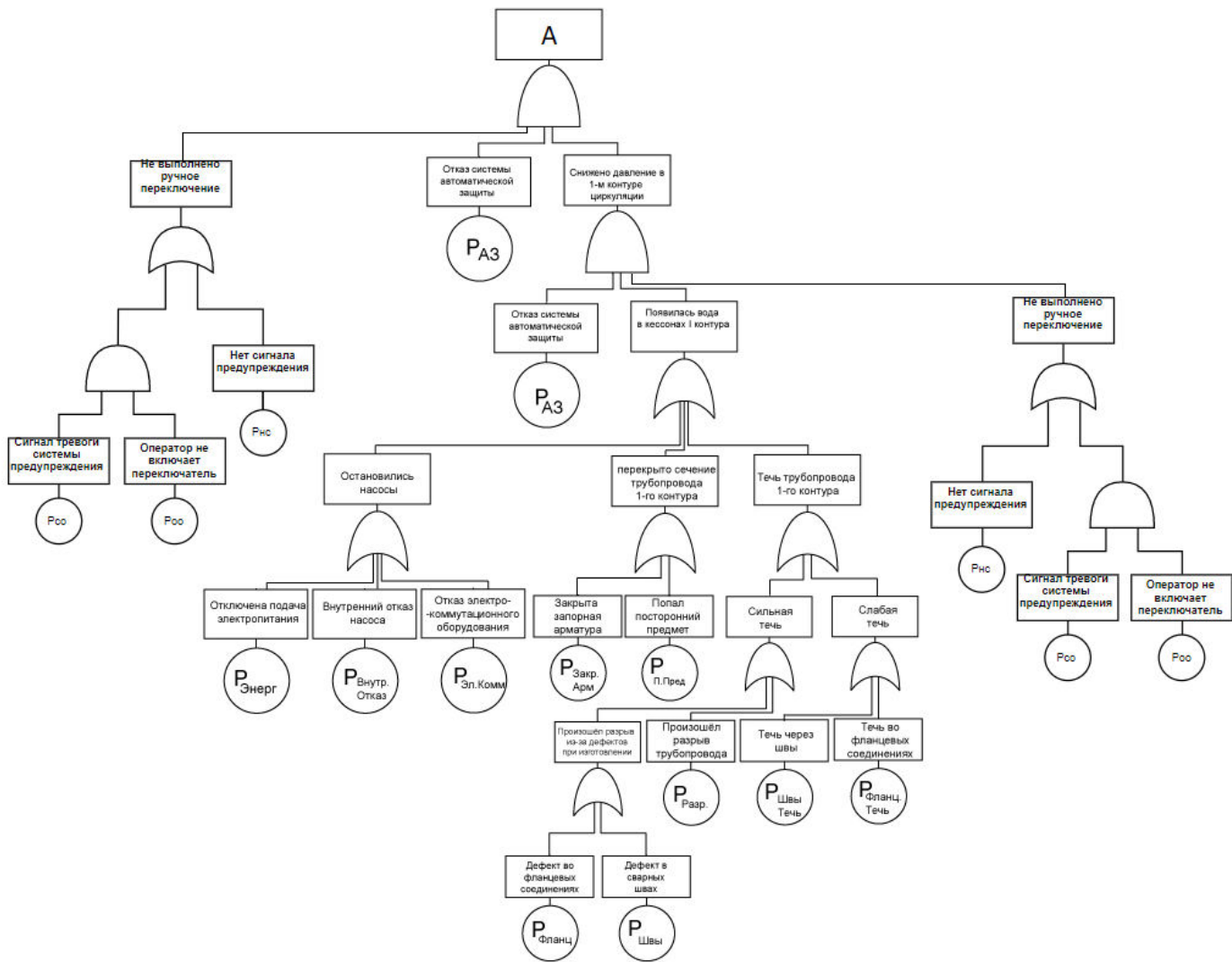
Разгерметизация ГЭК ($P_{\text{Разг.ГЭК}}$)



Расчёт по дереву отказов даёт значение для вероятности разгерметизации ГЭК:

$$P_{\text{Разг.ГЭК}} = (P_{\text{Лок.ГЭК}} + P_{\text{Раковина.ГЭК}} - P_{\text{Лок.ГЭК}} \cdot P_{\text{Раковина.ГЭК}}) + (P_{\text{Общ.ГЭК}} + P_{\text{Мех.ГЭК}} - P_{\text{Общ.ГЭК}} \cdot P_{\text{Мех.ГЭК}}) - (P_{\text{Лок.ГЭК}} + P_{\text{Раковина.ГЭК}} - P_{\text{Лок.ГЭК}} \cdot P_{\text{Раковина.ГЭК}}) \cdot (P_{\text{Общ.ГЭК}} + P_{\text{Мех.ГЭК}} - P_{\text{Общ.ГЭК}} \cdot P_{\text{Мех.ГЭК}}) = 10^{-4}.$$

A) Остановленный реактор, повреждение топлива, возможно превышение ДМД(A)



Вероятность течи трубопровода 1-го контура:

$$P_{\text{Теч.1к}} = P_{\text{Сильн}} + P_{\text{Слаб}} - P_{\text{Сильн}} \cdot P_{\text{Слаб}} = 10^{-3} + 2,8 \cdot 10^{-4} - 10^{-3} \cdot 2,8 \cdot 10^{-4} = 1,3 \cdot 10^{-3}.$$

Вероятность перекрытия сечения трубопровода 1-го контура:

$$P_{\text{Перекр}} = P_{\text{П.пред}} + P_{\text{Закр.Арм}} - P_{\text{П.пред}} \cdot P_{\text{Закр.Арм}} = 2,6 \cdot 10^{-2}.$$

Вероятность нарушения циркуляции в 1-м контуре и роста мощности реактора:

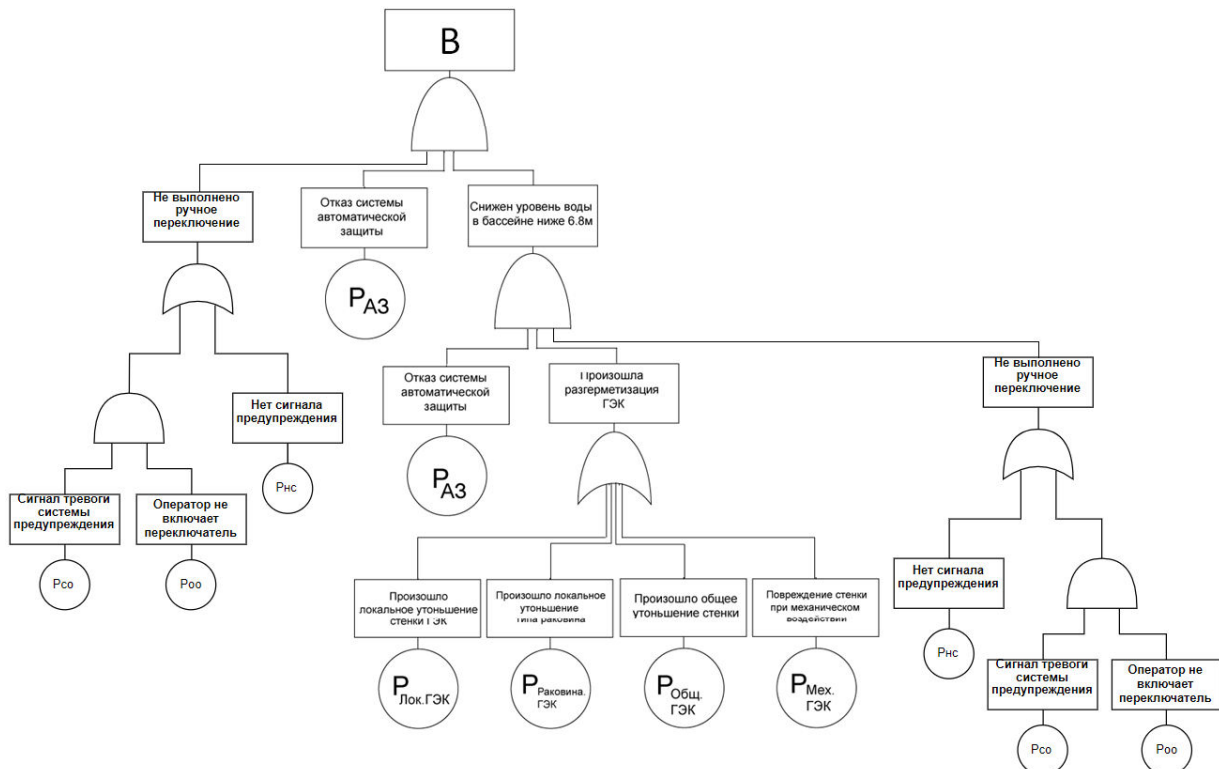
$$P_{\text{Наруш.Цирк}} = P_{\text{Ост.Нас}} + P_{\text{Перекр}} + P_{\text{Теч.1к}} - P_{\text{Ост.Нас}} \cdot P_{\text{Перекр}} - P_{\text{Ост.Нас}} \cdot P_{\text{Теч.1к}} - P_{\text{Перекр}} \cdot P_{\text{Теч.1к}} + P_{\text{Ост.Нас}} \cdot P_{\text{Перекр}} \cdot P_{\text{Теч.1к}}$$

Конечное событие: остановленный реактор, повреждение топлива, возможно превышение ДМД(A):

$$P_A = P_{\text{Наруш.Цирк}} \cdot P_{\text{А3}} \cdot P_{\text{А3}}$$

P(A)	0,55	0,26	0,16	0,09	0,02	0,003	0,0004	0,000002	0,003
17	1,00E-09	6,61E-10	5,60E-10	4,95E-10	4,33E-10	4,19E-10	4,17E-10	4,17E-10	4,42E-10
11	5,07E-09	1,97E-09	1,24E-09	8,25E-10	4,95E-10	4,28E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,37E-10
10	5,36E-09	2,06E-09	1,28E-09	8,44E-10	4,99E-10	4,28E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,42E-10
9	5,45E-09	2,09E-09	1,29E-09	8,50E-10	5,00E-10	4,28E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,44E-10
9	5,45E-09	2,09E-09	1,29E-09	8,50E-10	5,00E-10	4,28E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,44E-10
8	5,36E-09	2,06E-09	1,28E-09	8,44E-10	4,99E-10	4,28E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,42E-10
8	5,36E-09	2,06E-09	1,28E-09	8,44E-10	4,99E-10	4,28E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,42E-10
6	4,61E-09	1,84E-09	1,17E-09	7,94E-10	4,90E-10	4,27E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,29E-10
6	4,61E-09	1,84E-09	1,17E-09	7,94E-10	4,90E-10	4,27E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,29E-10
5	4,01E-09	1,66E-09	1,08E-09	7,52E-10	4,83E-10	4,26E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,17E-10
5	4,01E-09	1,66E-09	1,08E-09	7,52E-10	4,83E-10	4,26E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,17E-10
4	3,29E-09	1,43E-09	9,71E-10	7,00E-10	4,73E-10	4,25E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,03E-10
4	3,29E-09	1,43E-09	9,71E-10	7,00E-10	4,73E-10	4,25E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,03E-10
4	3,29E-09	1,43E-09	9,71E-10	7,00E-10	4,73E-10	4,25E-10	4,18E-10	4,17E-10	5,03E-10
3	2,51E-09	1,19E-09	8,44E-10	6,38E-10	4,62E-10	4,23E-10	4,17E-10	4,17E-10	4,85E-10
3	2,51E-09	1,19E-09	8,44E-10	6,38E-10	4,62E-10	4,23E-10	4,17E-10	4,17E-10	4,85E-10
3	2,51E-09	1,19E-09	8,44E-10	6,38E-10	4,62E-10	4,23E-10	4,17E-10	4,17E-10	4,85E-10

В) Остановленный реактор, без сопутствующих событий.

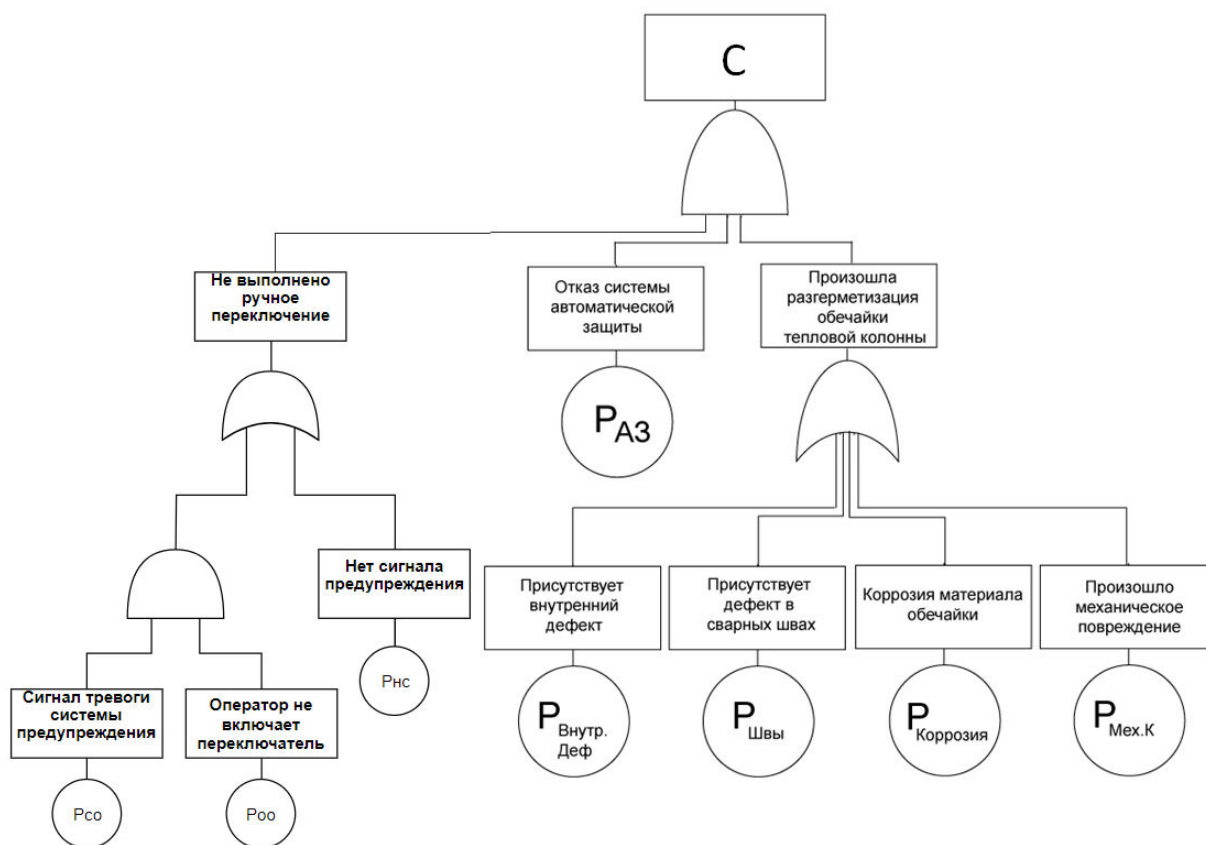


$$P_{ГЭК} = (P_{Лок.ГЭК} + P_{Раковина.ГЭК} - P_{Лок.ГЭК} \cdot P_{Раковина.ГЭК}) + (P_{Общ.ГЭК} + P_{Мех.ГЭК} - P_{Общ.ГЭК} \cdot P_{Мех.ГЭК}) - (P_{Лок.ГЭК} + P_{Раковина.ГЭК} - P_{Лок.ГЭК} \cdot P_{Раковина.ГЭК}) \cdot (P_{Общ.ГЭК} + P_{Мех.ГЭК} - P_{Общ.ГЭК} \cdot P_{Мех.ГЭК})$$

$$P_B = P_{ГЭК} \cdot P_{АЗ} \cdot P_{АЗ}$$

P(B)	0,55	0,26	0,16	0,09	0,02	0,003	0,0004	0,000002	0,003
17	1,18E-11	7,78E-12	6,59E-12	5,82E-12	5,10E-12	4,93E-12	4,90E-12	4,90E-12	5,20E-12
11	5,97E-11	2,32E-11	1,46E-11	9,71E-12	5,83E-12	5,03E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,32E-12
10	6,30E-11	2,42E-11	1,50E-11	9,93E-12	5,87E-12	5,04E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,38E-12
9	6,42E-11	2,45E-11	1,52E-11	1,00E-11	5,88E-12	5,04E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,40E-12
9	6,42E-11	2,45E-11	1,52E-11	1,00E-11	5,88E-12	5,04E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,40E-12
8	6,30E-11	2,42E-11	1,50E-11	9,93E-12	5,87E-12	5,04E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,38E-12
8	6,30E-11	2,42E-11	1,50E-11	9,93E-12	5,87E-12	5,04E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,38E-12
6	5,43E-11	2,16E-11	1,38E-11	9,34E-12	5,76E-12	5,03E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,22E-12
6	5,43E-11	2,16E-11	1,38E-11	9,34E-12	5,76E-12	5,03E-12	4,92E-12	4,90E-12	6,22E-12
5	4,71E-11	1,95E-11	1,27E-11	8,85E-12	5,68E-12	5,01E-12	4,91E-12	4,90E-12	6,09E-12
5	4,71E-11	1,95E-11	1,27E-11	8,85E-12	5,68E-12	5,01E-12	4,91E-12	4,90E-12	6,09E-12
4	3,87E-11	1,69E-11	1,14E-11	8,23E-12	5,57E-12	5,00E-12	4,91E-12	4,90E-12	5,92E-12
4	3,87E-11	1,69E-11	1,14E-11	8,23E-12	5,57E-12	5,00E-12	4,91E-12	4,90E-12	5,92E-12
4	3,87E-11	1,69E-11	1,14E-11	8,23E-12	5,57E-12	5,00E-12	4,91E-12	4,90E-12	5,92E-12
3	2,95E-11	1,40E-11	9,93E-12	7,51E-12	5,43E-12	4,98E-12	4,91E-12	4,90E-12	5,71E-12
3	2,95E-11	1,40E-11	9,93E-12	7,51E-12	5,43E-12	4,98E-12	4,91E-12	4,90E-12	5,71E-12
3	2,95E-11	1,40E-11	9,93E-12	7,51E-12	5,43E-12	4,98E-12	4,91E-12	4,90E-12	5,71E-12

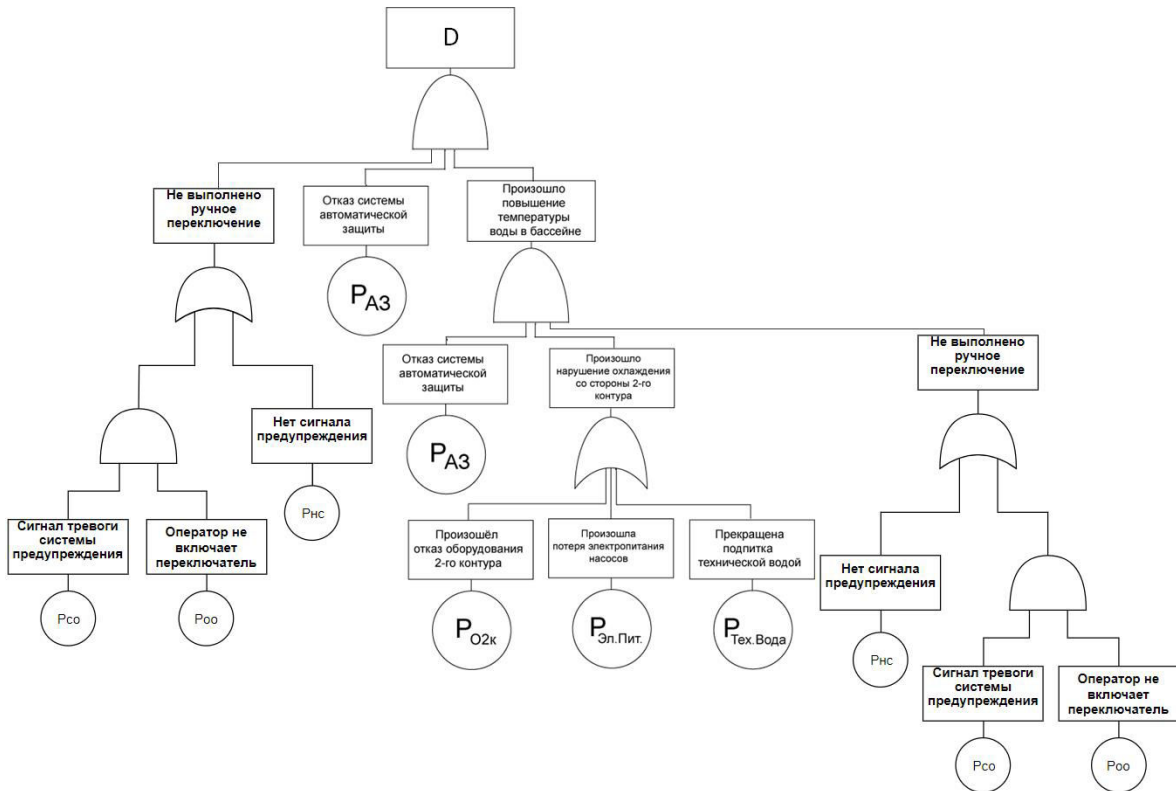
С) Остановленный реактор, снижение уровня воды в бассейне



$$P_C = P_{\text{Разг.Обеч}} \cdot P_{A3}$$

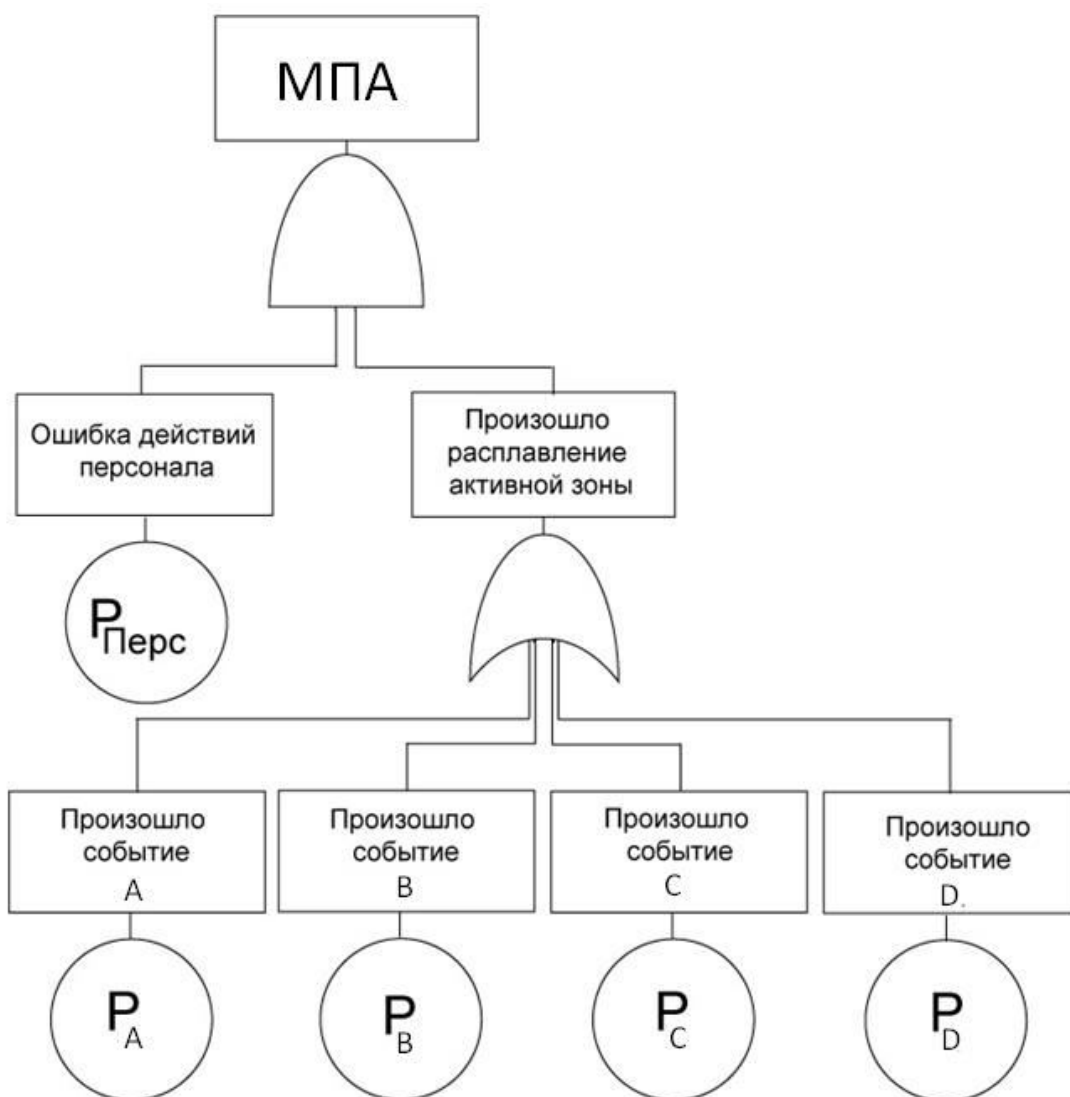
P(C)	0,55	0,26	0,16	0,09	0,02	0,003	0,0004	0,000002	0,003
17	3,58E-08	2,91E-08	2,68E-08	2,52E-08	2,36E-08	2,32E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,38E-08
11	8,06E-08	5,03E-08	3,98E-08	3,25E-08	2,52E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,62E-08
10	8,28E-08	5,13E-08	4,05E-08	3,29E-08	2,53E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,64E-08
9	8,36E-08	5,17E-08	4,07E-08	3,30E-08	2,53E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,64E-08
9	8,36E-08	5,17E-08	4,07E-08	3,30E-08	2,53E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,64E-08
8	8,28E-08	5,13E-08	4,05E-08	3,29E-08	2,53E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,64E-08
8	8,28E-08	5,13E-08	4,05E-08	3,29E-08	2,53E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,64E-08
6	7,69E-08	4,85E-08	3,87E-08	3,19E-08	2,51E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,60E-08
6	7,69E-08	4,85E-08	3,87E-08	3,19E-08	2,51E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,60E-08
5	7,16E-08	4,60E-08	3,72E-08	3,10E-08	2,49E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,57E-08
5	7,16E-08	4,60E-08	3,72E-08	3,10E-08	2,49E-08	2,34E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,57E-08
4	6,49E-08	4,29E-08	3,53E-08	2,99E-08	2,46E-08	2,33E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,54E-08
4	6,49E-08	4,29E-08	3,53E-08	2,99E-08	2,46E-08	2,33E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,54E-08
4	6,49E-08	4,29E-08	3,53E-08	2,99E-08	2,46E-08	2,33E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,54E-08
3	5,67E-08	3,90E-08	3,29E-08	2,86E-08	2,43E-08	2,33E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,49E-08
3	5,67E-08	3,90E-08	3,29E-08	2,86E-08	2,43E-08	2,33E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,49E-08
3	5,67E-08	3,90E-08	3,29E-08	2,86E-08	2,43E-08	2,33E-08	2,31E-08	2,31E-08	2,49E-08

D) Остановленный реактор при нарушении охлаждения со стороны 2-го контура



$$P_D = P_{\text{Наруш.Охл.2к}} \cdot P_{A3} \cdot P_{A3}$$

P(D)	0,55	0,26	0,16	0,09	0,02	0,003	0,0004	0,000002	0,003
17	1,18E-09	7,78E-10	6,59E-10	5,82E-10	5,10E-10	4,93E-10	4,90E-10	4,90E-10	5,20E-10
11	5,97E-09	2,32E-09	1,46E-09	9,71E-10	5,83E-10	5,03E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,32E-10
10	6,30E-09	2,42E-09	1,50E-09	9,93E-10	5,87E-10	5,04E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,38E-10
9	6,42E-09	2,45E-09	1,52E-09	1,00E-09	5,88E-10	5,04E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,40E-10
9	6,42E-09	2,45E-09	1,52E-09	1,00E-09	5,88E-10	5,04E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,40E-10
8	6,30E-09	2,42E-09	1,50E-09	9,93E-10	5,87E-10	5,04E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,38E-10
8	6,30E-09	2,42E-09	1,50E-09	9,93E-10	5,87E-10	5,04E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,38E-10
6	5,43E-09	2,16E-09	1,38E-09	9,34E-10	5,76E-10	5,03E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,22E-10
6	5,43E-09	2,16E-09	1,38E-09	9,34E-10	5,76E-10	5,03E-10	4,92E-10	4,90E-10	6,22E-10
5	4,71E-09	1,95E-09	1,27E-09	8,85E-10	5,68E-10	5,01E-10	4,91E-10	4,90E-10	6,09E-10
5	4,71E-09	1,95E-09	1,27E-09	8,85E-10	5,68E-10	5,01E-10	4,91E-10	4,90E-10	6,09E-10
4	3,87E-09	1,69E-09	1,14E-09	8,23E-10	5,57E-10	5,00E-10	4,91E-10	4,90E-10	5,92E-10
4	3,87E-09	1,69E-09	1,14E-09	8,23E-10	5,57E-10	5,00E-10	4,91E-10	4,90E-10	5,92E-10
4	3,87E-09	1,69E-09	1,14E-09	8,23E-10	5,57E-10	5,00E-10	4,91E-10	4,90E-10	5,92E-10
3	2,95E-09	1,40E-09	9,93E-10	7,51E-10	5,43E-10	4,98E-10	4,91E-10	4,90E-10	5,71E-10
3	2,95E-09	1,40E-09	9,93E-10	7,51E-10	5,43E-10	4,98E-10	4,91E-10	4,90E-10	5,71E-10
3	2,95E-09	1,40E-09	9,93E-10	7,51E-10	5,43E-10	4,98E-10	4,91E-10	4,90E-10	5,71E-10



В качестве МПА для ИРТ МИФИ установлено полное оплавление ТВС при блокировке проходного сечения для теплоносителя. Оплавление активной зоны может произойти при событиях А, В, С, D.

Таблица 2.1.

МПА		Незнание в новой или редкой ситуации с наличием потенциальной важности	Нехватка времени для обнаружения или исправления ошибки	Шумные / беспорядочные сигналы	Средство подавления или переопределения информации	Неудовлетворительный системный / пользовательский интерфейс	Информационная перегрузка	Перенос знаний с одного задания к другому	Слабая, неоднозначная или плохо подобранная обратная связь	Бедность инструкций или процедур
		17	11	10	9	8	6	5	4	3
Полностью неизвестное, выполняемое на скорость, с непонятными последствиями	0,55	2,09E-08	2,28E-07	2,45E-07	2,50E-07	2,45E-07	2,03E-07	1,69E-07	1,31E-07	9,06E-08
Изменение/ возраст в исходное состояние системы в новое/начальное состояние с одной попытки без контроля за процедурой	0,26	7,94E-09	6,43E-08	6,83E-08	6,97E-08	6,83E-08	5,79E-08	4,94E-08	3,94E-08	2,86E-08
Трудное задание, требующее высокого уровня понимания и мастерства	0,16	4,48E-09	3,08E-08	3,26E-08	3,32E-08	3,26E-08	2,80E-08	2,42E-08	1,97E-08	1,47E-08
Довольно простое задание, выполняемое быстро или требующее мало внимания	0,09	2,36E-09	1,40E-08	1,47E-08	1,49E-08	1,47E-08	1,28E-08	1,12E-08	9,33E-09	7,15E-09
Рутинная, хорошо отработанная быстрая процедура, включающая относительно низкий уровень мастерства	0,02	4,90E-10	2,38E-09	2,48E-09	2,52E-09	2,48E-09	2,21E-09	1,98E-09	1,69E-09	1,34E-09
Восстановление или изменение системы до начального или нового состояния в соответствии с процедурой	0,003	7,23E-11	3,31E-10	3,44E-10	3,48E-10	3,44E-10	3,09E-10	2,79E-10	2,40E-10	1,92E-10
Полностью знакомое, хорошо продуманное, рутинное задание, выполняемое несколько раз в час в соответствии с высочайшими стандартами, выполняемое высоко мотивированными, высококвалифицированными и тренированными людьми, полностью осведомленными о последствиях отказа, с наличием времени для исправления потенциальной ошибки, но без преимуществ от значительных вспомогательных средств	4E-04	9,61E-12	4,36E-11	4,53E-11	4,59E-11	4,53E-11	4,07E-11	3,68E-11	3,17E-11	2,55E-11
Корректное реагирование на команду системы даже в случае наличия дополнительной или автоматизированная контролирующая система, обеспечивающая точную интерпретацию состояния системы	2E-06	4,80E-14	2,18E-13	2,26E-13	2,29E-13	2,26E-13	2,03E-13	1,84E-13	1,58E-13	1,27E-13
Различные задачи, для которых отсутствуют описания	0,03	7,43E-10	3,72E-09	3,89E-09	3,94E-09	3,89E-09	3,45E-09	3,08E-09	2,62E-09	2,06E-09

Таблица 2.2.

МПА без АЗ		Незнание в новой или редкой ситуации с наличием потенциальной важности	Нехватка времени для обнаружения или исправления ошибки	Шумные / беспорядочные сигналы	Средство подавления или переопределения информации	Неудовлетворительный системный / пользовательский интерфейс	Информационная перегрузка	Перенос знаний с одного задания к другому	Слабая, неоднозначная или плохо подобранная обратная связь	Бедность инструкций или процедур
		17	11	10	9	8	6	5	4	3
Полностью неизвестное, выполняемое на скорость, с непонятными последствиями	0,55	3,17E-07	4,77E-06	5,18E-06	5,32E-06	5,18E-06	4,14E-06	3,35E-06	2,48E-06	1,63E-06
Изменение/ возраст в исходное состояние системы в новое/начальное состояние с одной попытки без контроля за процедурой	0,26	1,13E-07	1,10E-06	1,18E-06	1,21E-06	1,18E-06	9,77E-07	8,18E-07	6,36E-07	4,47E-07
Трудное задание, требующее высокого уровня понимания и мастерства	0,16	6,25E-08	4,85E-07	5,16E-07	5,26E-07	5,16E-07	4,36E-07	3,72E-07	2,98E-07	2,17E-07
Довольно простое задание, выполняемое быстро или требующее мало внимания	0,09	3,24E-08	2,06E-07	2,17E-07	2,21E-07	2,17E-07	1,88E-07	1,63E-07	1,34E-07	1,01E-07
Рутинная, хорошо отработанная быстрая процедура, включающая относительно низкий уровень мастерства	0,02	6,61E-09	3,26E-08	3,41E-08	3,45E-08	3,41E-08	3,03E-08	2,71E-08	2,30E-08	1,82E-08
Восстановление или изменение системы до начального или нового состояния в соответствии с процедурой	0,003	9,70E-10	4,45E-09	4,63E-09	4,69E-09	4,63E-09	4,16E-09	3,75E-09	3,22E-09	2,58E-09
Полностью знакомое, хорошо продуманное, рутинное задание, выполняемое несколько раз в час в соответствии с высочайшими стандартами, выполняемое высоко мотивированными, высококвалифицированными и тренированными людьми, полностью осведомленными о последствиях отказа, с наличием времени для исправления потенциальной ошибки, но без преимуществ от значительных вспомогательных средств	4E-04	1,29E-10	5,85E-10	6,08E-10	6,15E-10	6,08E-10	5,47E-10	4,94E-10	4,25E-10	3,42E-10
Корректное реагирование на команду системы даже в случае наличия дополнительная или автоматизированная контролирующая система, обеспечивающая точную интерпретацию состояния системы	2E-06	6,44E-13	2,92E-12	3,03E-12	3,07E-12	3,03E-12	2,73E-12	2,46E-12	2,12E-12	1,71E-12
Различные задачи, для которых отсутствуют описания	0,03	1,00E-08	5,16E-08	5,40E-08	5,48E-08	5,40E-08	4,78E-08	4,25E-08	3,60E-08	2,82E-08

В таблице 2.1. и 2.2 приведены результаты вероятностной оценки МПА на ИРТ МИФИ со системой АЗ и без системы АЗ.

По результате найдена консервативная оценка вероятности МПА ИРТ МИФИ

- с АЗ равна $2,5 \cdot 10^{-7}$
- без АЗ равна $5,32 \cdot 10^{-6}$.

Разница на порядок показывает значимость системы автоматической защиты и грамотность ее проектирования на ИРТ МИФИ. В случае выхода ее из строя вклад человека в частоту максимальной проектной аварии значительно возрастает.

ВЫВОДЫ

В ходе работы проведен анализ литературы для задач оценки надежности и риска, изучены литературные материалы по ИРТ МИФИ. Выполнен обзор литературы по учету вклада человеческого фактора в отказы технических систем, выбран метод HEART как наиболее подходящий для проведения исследований ИРТ МИФИ.

При использовании метода HEART все действия, которые должен выполнить оператор, разделяются на несколько типов различной сложности. При этом учитываются внешние факторы, способствующие увеличению вероятности ошибки, такие как шум, стресс или необходимость принимать ответственное решение в короткие сроки.

Проведен анализ данных для ИРТ МИФИ. На основе имеющихся в литературе деревьев отказа, не учитывающих влияние автоматической системы, построены дополненные деревья, позволяющие оценить значимость автоматической системы в оценке конечного результата.

Проведены оценки по вероятностным моделям для МПА ИРТ МИФИ. В результате получено, что в условиях, приближенных к стандартным условиям работы оператора, человеческий вклад невелик, вследствие грамотной разработки системы аварийной защиты ИРТ МИФИ. В критических ситуациях, когда необходимо быстро выполнять незнакомые действия или в условиях повышенного шумового фона вклад человека в конечную частоту максимальной проектной аварии ИРТ МИФИ становится значительным. Также в случае отключения или отказа системы аварийной защиты действия оператора становятся определяющими.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. J. Smith - Reliability, Maintainability and Risk - Practical Methods for Engineers с.113-119, 286-300.
2. Hiromitsu Komamoto - Satisfying Safety Goals by Probabilistic Risk Assessment
3. Mark Tweeddale - Managing Risk and Reliability of Process Plant
4. Sue Cox, Robin Tait - Safety, Reliability and Risk Management: an integrated approach
5. Guidelines for Preventing Human Error in Process Safety - Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers 345 East 47th Street, New York, NY10017
6. Methods for determining and processing probabilities - Publication Series on Dangerous Substances 4 – 2.13, 2.15, 2.20, 2.23, 3.7, 3.8.
7. А. В. Матвеев, А. В. Максимов, О. В. Щербakov, А. С. Смирнов – Метод Оценки Достоверности Количественного Анализа Риска на Объектах Нефтегазовой Отрасли
8. Н.В. Плешакова, А.Н. Анохин - Анализ Ошибок, Допускаемых Операторами БЩУ АЭС При Использовании Эксплуатационных Процедур
9. P. L. Clemens - Human Factors and Operator Errors
10. Александр Леоненков – Нечеткое Моделирование в Среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт-Петербург, 2005.
11. В. В. Костерев - Агрегирование вероятностной и нечеткой информации в задачах оценки риска
12. В. С. Симанков, С. Н. Владимиров, А. О. Денисенко, А. Н. Черкасов - Методологические Аспекты Построения Систем Поддержки Принятия Решений
13. В. В. Костерев, Аунг Тхут Вин, А. А. Портнов, К. В. Станкевич - Оценка Риска Исследовательского Реактора ИРТ МИФИ с Использованием Нечеткого Подхода
14. М.Н. Тихонов, О.Э. Муратов - Человеческий Фактор в Условиях Чрезвычайных Ситуаций и Аварий на Атомных Станциях
15. Емец Евгений Геннадьевич - Оптимизация Условий Облучения и Разработка Установки для Ядерного Легирования Кремния в Реакторе ИРТ-Т
16. Клемин А. И. - Инженерные вероятностные расчеты при проектировании ядерных реакторов [Текст] / А. И. Клемин. - М.: Атомиздат, 1973. - 304 с.
17. Ayub Bilal M. - Risk analysis in engineering and economics [Text] / Bilal M. Ayub. - Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003. - ISBN 1-58488-395-2.
18. В. В. Костерев – Надежность технических систем и управление риском. Москва 2008.
19. В.П. Алферова - Исследовательский Ядерный Реактор ИРТ МИФИ. Учебное пособие по эксплуатационной практике. Москва 2012.
20. F. Castiglia, M. Giardina – Fuzzy Risk Analysis of a Modern G-Ray Industrial Irradiator.