

Использование экспертных методов для анализа углубленной оценки безопасности 1-го энергоблока Курской АЭС

Васекин В.Н. (Россия, НИКИЭТ), Чулкова Т.Ю. (Россия, НТЦ ЯРБ Госатомнадзора РФ)

Осуществляемое Госатомнадзором России в целях повышения безопасности лицензирование деятельности в области использования атомной энергии, формально отсчитывается от 14 июля 1997 г. и проводится в соответствии с «Положением о лицензировании в области использования атомной энергии» [1]. Положение о лицензировании устанавливает перечень видов деятельности, для осуществления которых требуется получение лицензий, порядок выдачи и прекращения действия лицензий.

В процессе лицензирования Госатомнадзором России может быть принято решение о проведении экспертизы обосновывающей безопасность документации на соответствие действующим требованиям по безопасности в области использования атомной энергии. От качества выполненной экспертизы зависит обоснованность принимаемых решений при лицензировании и формулирование условий действия лицензии. Изменения условий действия лицензии реализуют механизм применяемого в России подхода к регулированию безопасности АС.

Разработка методического, системного, последовательного подхода к экспертизе проведенного заявителем обоснования безопасности является актуальной задачей как с точки зрения практической поддержки лицензирования, так и с научно-методической точки зрения – развитие инженерных и экспертных подходов к оценке безопасности АС.

Таким образом, в докладе представлены:

- адаптированная к отечественной нормативной базе и дополненная методика линий защиты (LoD), предназначенная для получения экспертных оценок безопасности действующих АС [2, 3];
- результаты экспертизы безопасности первого энергоблока Курской АЭС, выполненной с помощью методики линий защиты (LoD) и основывающейся на расчетном анализе проектных аварий в РУ с РБМК. Оценка выполнена для системы аварийного охлаждения реактора;
- общие положения методики, основанной на понятии риск [4].

В качестве дополнения к назначаемой при лицензировании экспертизе обосновывающей безопасности документации в докладе предлагается методический подход линий защиты (Lines of Defence), примененный в 1995-1998 гг. при углубленном анализе безопасности (УОБ) Игналинской АЭС и переданный российской стороне в проекте TACIS TS/RF/10 по оказанию содействия лицензированию мероприятий по модернизации систем Ленинградской АЭС [5].

Методика экспертизы УОБ 2-го энергоблока ИАЭС была основана на том принципе, что для защиты от последствий соответствующих исходных событий требуется некоторое количество линий защиты (Lines of Defence - LoD), классифицированных как сильные (Strong Line - S) или слабые (Weak Line - W). Линия защиты определена как система безопасности или система нормальной эксплуатации, выполняющая заданную функцию по отношению к рассматриваемому исходному событию.

Первый этап оценки подразумевает качественное определение статуса рассматриваемой системы как сильной линии защиты против исходного события, которая одновременно

удовлетворяет трем принятым в методике критериям аттестации (Q, R, A). Слабая линия защиты - система, которая не может быть квалифицирована на основе критериев аттестации как сильная.

Критерии аттестации определены как: качество (Q-Qaulified for duty), резервирование (R-Redundant), автоматизация (A- Automatic) и включают комплексную оценку: во-первых, консервативности проекта и обеспечения качества при изготовлении, монтаже, испытаниях, техобслуживании (ремонте), во-вторых, резервирования системы и ее защищенности от отказа по общей причине. Выполнение второго критерия аттестации свидетельствует о том, что система удовлетворяет принципу единичного отказа. В-третьих, для активных систем действие защиты должно быть автоматическим. Для такого специфического элемента линии защиты как персонал оценка по третьему критерию (A) –это оценка наличия допустимого времени для диагностики и устранения одной ошибки персонала. При анализе пассивных систем оценивается качество, консерватизм проекта (Q-Qualified) и надежность (R-Reliable).

На втором этапе результаты анализа представляются на диаграмме безопасности – ключевом моменте данной методики, позволяющем формализованно моделировать сложные системы и процессы для уяснения закономерностей их взаимодействия (рис. 1, 2). Значение на оси ординат диаграммы безопасности - это статус системы, итоговая, наиболее консервативная, качественно определенная по совокупности ответов на стандартные критерии (Q, R, A) в терминах методики (S или W) характеристика рассматриваемой системы. Значение на оси абсцисс - категория ожидаемых последствий аварийного режима того исходного события, для которого линия защиты выполняет заданную функцию.

Очевидно, что анализ покажет область недопустимых состояний (NT) на диаграмме безопасности при полном отсутствии системы (функции безопасности) и, соответственно, линии защиты против выбранного исходного события. Диаграмма предполагает, что чем серьезнее последствие аварийного сценария, тем большее количество и более сильные линии защиты должны существовать между ним и исходным событием.

Развитие и апробация адаптированной методики линий защиты проводились в процессе экспертизы отчета по углубленной оценке безопасности первого энергоблока Курской АЭС. ОУОБ представлен в Госатомнадзор РФ в составе заявки на получение долгосрочной лицензии на эксплуатацию [6].

Работоспособность системы аварийного охлаждения реактора и эффективность ее модернизации оценивались в следующем порядке:

- оценка системы и выполняемой ею функции безопасности на соответствие критериям аттестации методики. Оценка выполнена для системы, которая будет функционировать после модернизации, т.е с сооруженным полномасштабным каналом САОР-2, расположенным в отдельно стоящем здании-модуле;
- выбор исходных событий, построение деревьев событий, расчетное определение категории последствий;
- построение диаграммы и определение категории безопасности энергоблока;
- заключение по результатам анализа.

Совокупность оценок по критерию качества, разделенному на 5 тематических подвопросов (табл. 1), позволила определить САОР как сильную линию защиты.

Таблица 1. Критерий качества

Q1	<p>1. Будет ли система полностью выполнять заданные функции в условиях, предусмотренных проектом?</p> <p>2. Предусмотрены ли в проекте АС средства, с помощью которых исключаются единичные ошибки персонала или ослабляются их последствия, в том числе при техобслуживании?</p> <p>3. Не приводит ли совмещение функций безопасности с функциями нормальной эксплуатации к нарушениям требований обеспечения безопасности АС и снижению требуемой надежности системы?</p> <p>4. Определены ли проектом АС и рабочей документацией систем программы и методики испытаний, проверки и контроля работоспособности систем?</p>	<p>S</p> <p>W</p> <p>S</p> <p>S</p>
Q2	<p>5. Проводятся ли испытания системы и является ли их периодичность достаточной для подтверждения работоспособности системы?</p> <p>6. Выдержит ли система без разрушений статические и динамические нагрузки и температурные воздействия, возникающие в любых ее узлах и компонентах?</p>	<p>S</p> <p>S</p>
Q3	<p>7. Выполнит ли система свои функции в установленном проектом объеме с учетом воздействия природных явлений, внешних техногенных событий и/или при возможных воздействиях проектных аварий?</p>	W
Q4	<p>8. Проходит ли система полную диагностику (проверку) на соответствие проектным показателям при вводе в эксплуатацию, после ремонта и периодически в течение всего срока службы?</p>	S
Q5	<p>9. Соответствуют ли статусу качества Q/QRA все системы, поддерживающие данную систему?</p>	W

Тем не менее, оценка по критерию Q1 показала, что протекание и ликвидация всех представленных в отчете аварийных режимов в КМПЦ находится в зависимости от квалификации человеческого фактора. На персонал возложены функции управлять оборудованием вручную (например, органами парораспределения), являться резервом при отказе автоматики (АВР), определять неисправность, контролируя параметры, причем иногда косвенным образом на БЩУ-О или визуально на местах (например, плотность последней по ходу арматуры питательных узлов, дренажей при гидроиспытаниях). Такой подход при проектировании системы не может гарантировать надежность ее эксплуатации. Необходим анализ возможных ошибок персонала.

Согласно критерию Q3, что часть оборудования САОР в части системы подачи питательной воды (насосная группа ПЭН-1÷3, БЧК, трубопроводы) не соответствует требованиям п. 4.1.5 [7]. На трубопроводах СППВ не установлены устройства, уменьшающие влияние сейсмических воздействий. Отсутствуют современные исследования, подтверждающие прочность и надежность элементов системы для выполнения своих функций с учетом воздействия природных явлений, внешних техногенных событий, свойственных выбранной для сооружения площадке, возможных механических, тепловых, химических и прочих воздействиях проектных аварий.

Оценка по критерию Q5 показала, что во всех эксплуатационных режимах отказы во вспомогательных и подключенных системах не приводят к полной потере САОР своих функций, тем не менее для этих систем и управляющей системы безопасности отмечены очень существенные недостатки и определен ряд организационно-технических мероприятий по их ликвидации.

По второму критерию соответствия проекта системы регламентируемым нормативными документами принципам резервирования (избыточности), физического разделения (или независимости) и разнотипности (или разнообразия) система САОР оценивается как слабая линия защиты с точки зрения ее устойчивости к единичному отказу и отказу по общей причине.

Обозначены мероприятия по дальнейшему перенесению элементов САОР в отдельные помещения для повышения надежности работы системы. Тем не менее на блоке имеются отдельные дефекты (пересечение кабелей, трубопроводы разных систем в общих коридорах и др.), которые могут быть общей причиной отказа САОР.

Представленный поэлементный анализ единичных отказов показал достаточную зарезервированность элементов системы. Работоспособность элементов, отказы или комбинация отказов которых приводит к отказам каналов как быстродействующей подсистемы, так и подсистемы длительного расхолаживания, должна постоянно контролироваться. В основном это отказы на открытие/закрытие быстродействующих задвижек и обратных клапанов. Например, необходим постоянный контроль:

- незакрытия клапана на трубопроводе к системам машзала от НДК, вследствие чего прекращается подача воды из БЧК к АПЭН-1,2,3;
- закрытия клапана П05611 на трубопроводе от БЧК на АПЭН – 4,5;
- отклонения давления или уровня за допустимые пределы в БЧК, БАП-2.

Оценка по критерию автоматизации показала, что рабочий проект реконструкции САОР-1 не требует вмешательства персонала в работу систем, однако, требуются дополнительные мероприятия по блокированию действий оператора при автоматическом срабатывании САОР.

САОР не обладает свойствами внутренней самозащищенности. В данном случае «самозащищенность» – это реализация комплекса мероприятий по оперативному и неоперативному контролю за состоянием металла трубопроводов диаметром более 300 мм и внедрению технологии "течь перед разрушением".

Таблица 2. Оценка линии защиты по критериям аттестации

Q	Итоговая характеристика по критерию качества.	S
R	Удовлетворяет ли проект системы принципам резервирования, независимости и разнообразия?	2W
A	Насколько система автоматически выполняет свои функции?	S

На втором этапе оценки по методике линий защиты использовались результаты расчетного анализа, выполненного автором с помощью кода ATHLET 1.2A в рамках НИР НТЦ ЯРБ по составлению атласа аварийных режимов. Рассмотрены два исходных события: полный разрыв опускного трубопровода барабана- сепаратора (два режима протекания аварии) и разрыв раздаточного группового коллектора после обратного клапана с обесточиванием собственных нужд энергоблока.

Из анализа первого ИС следует, что имеется достаточное время для вмешательства оператора и организации отвода остаточного тепловыделения от активной зоны. Последствием аварийного режима 1 в случае отсутствия подачи воды от сторонних источников будет локальное повреждение небольшого числа каналов в пределах проектной мощности систем сброса давления из РП и СЛА (L). Для режима 2 с отказом 4 БРУ-К рассчитанные значения максимумов давления не представляют опасности для целостности элементов КМЩЦ. Последствия аварийного режима 2 также оцениваются как L.

Анализ второго ИС показал, что если срыв подающей воду в БС насосной группы АПЭН-1÷3 произойдет при разрыве РГК после ОК с наложением потери питания собственных нужд

(остановом ПЭН) в качестве зависимого отказа при срабатывании аварийной защиты (АЗ), то подача воды в аварийный РГК от АПЭН-4,5 будет неэффективна. Исходное событие вызывает опрокидывание циркуляции в каналах аварийного РГК. Активная зона должна охлаждаться потоком насыщенной воды из барабана-сепаратора. Подобный алгоритм САОР с подачей питательной воды в активную зону противотоком из БС отсутствует. Возможное нарушение проектных пределов повреждения оболочек твэлов можно предотвратить, организовав подачу воды в БС от сторонних источников (НДК, НАП). Вышесказанное может быть отнесено к срыву «холодных» АПЭН-1÷3 вследствие отсутствия схемы автоматического ввода резерва (АВР) НДК и работы автоматики по сигналам потери собственных нужд 6 кВ, предусматривающей приоритет подачи подпиточной воды в деаэраторы.

Расчётное обоснование, доказывающее, что при потере работоспособности насосной группы АПЭН-1÷3, подающей воду в БС, во всех перечисленных случаях не произойдёт превышения проектных пределов повреждений оболочек твэлов при авариях с разрывом РГК отсутствует. Последствия данного аварийного режима оцениваются как расплавление активной зоны, которое не приводит к полному отказу СЛБ (М) с категорией безопасности энергоблока (NT). Эксплуатация без резервного алгоритма подачи воды в БС не допустима.

Результаты оценки представлены на диаграммах установленной формы (рис. 1, 2).

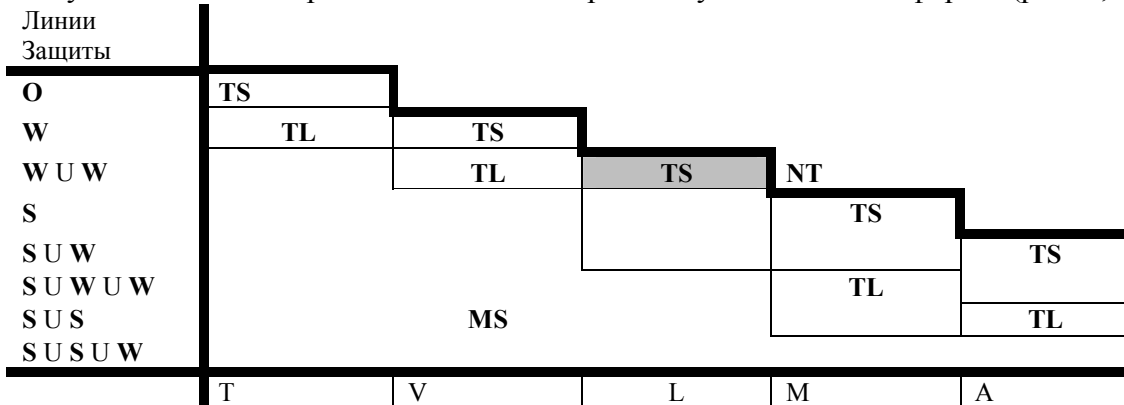


Рис. 1 Диаграмма безопасности аварийного режима с разрывом опускного трубопровода барабана -сепаратора.

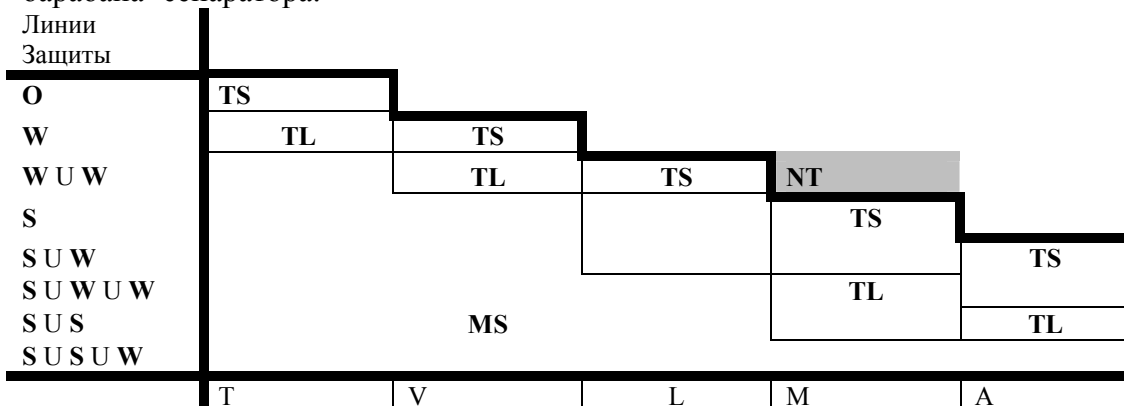


Рис. 2 Диаграмма безопасности аварийного режима с разрывом раздаточного группового коллектора после обратного клапана.

Подобласть TS диаграммы безопасности - это категория безопасности энергоблока, при которой эксплуатация с референтным состоянием САОР допустима на короткий период времени, решение выявленных при анализе проблем должно быть осуществлено без задержек, за короткий период времени, возможно при компенсирующих мероприятиях. В российской регулирующей практике это означает, что условия лицензии должны быть выполнены до выдачи лицензии.

Подобласть NT - категория, при которой до устранения проблемы эксплуатация не обоснована, в выдаче лицензии на эксплуатацию должно быть отказано. Должно быть выполнено соответствующее расчетное обоснование безопасности.

Энергоблок 1 Курской АЭС не удовлетворяет современным требованиям по безопасности в полном объеме. Выявленные технические и организационных моменты в проекте станции и в эксплуатационной практике, особенно те, которые были определены в ходе оценки как значительные для безопасности, требующие останова энергоблока, должны быть ликвидированы. Реконструкция систем займет определенное время, поэтому важно, что эксплуатирующая организация демонстрирует желание работать в направлении по ликвидации выявленных при оценке технических и организационных недостатков для достижения приемлемого и достаточного для продолжения эксплуатации уровня безопасности.

Общие положения методики экспертной оценки безопасности действующих АС, основанной на понятии риск, охватывающем вероятность исходного события (p) и его последствия (d) [8].

$$R = pd \quad (1)$$

Предлагаемая методика включает в себя все основные понятия методики линий защиты, изложенной в главе четыре, но использует свою собственную аналогичную диаграмме Фармера диаграмму (рис. 3), где граница разделения областей допустимых и недопустимых состояний (NT), соответствует кривой постоянного риска [9].

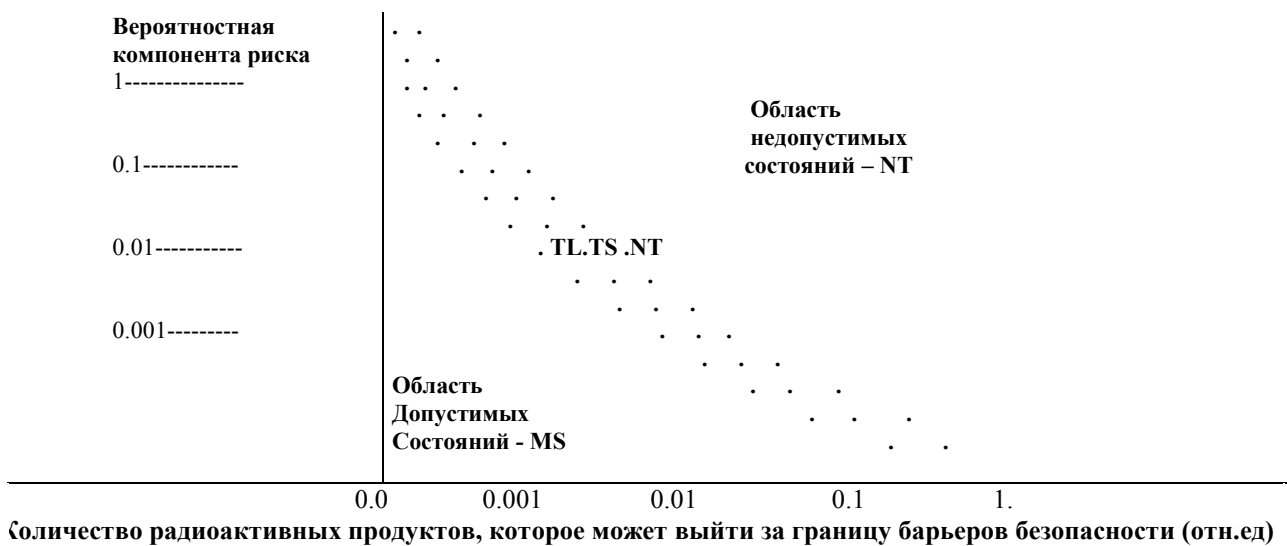


Рис. 3 Диаграмма безопасности методики, основанной на понятии риск.

Линии TS и TL выделяют подобласти состояний, при которых эксплуатация блока АС допустима в течение времени T_1 и T_2 до момента реализации компенсирующих мероприятий и перевода блока в область современного стандарта (MS). Линия TS диаграммы определяется так же определяется постоянным значением вероятности:

$$Pd = const \quad (2)$$

где P - интегральная вероятность в интервале времени T_1 :

$$p = P / T_1 \quad (3)$$

$$pd = \text{const} / T_1 \quad (4)$$

$$P = \int_{T_1} p(t)dt, \quad p = \int_{T_1} p(t)dt / T_1 \quad (5)$$

Подобласть состояний, определяющих эксплуатацию в течение времени T_1 :

$$pd \geq \text{const} / T_1 \quad (6)$$

Аналогично TS линия TL диаграммы определяется как:

$$Pd = \text{const} \quad (7)$$

$$\text{или } pd = \text{const} / T_2 \quad (8),$$

где P - интегральная вероятность в интервале времени T_2 :

$$P = \int_{T_2} p(t)dt, \quad p = \int_{T_2} p(t)dt / T_2 \quad (9)$$

Подобласть состояний, определяющих эксплуатацию в течение времени T_2 :

$$pd \geq \text{const} / T_2 \quad (10)$$

Предельно допустимое время эксплуатации в состоянии с заданной величиной риска - это интервал времени Δt , на котором интегральная вероятность исходного события Pt с последствиями d имеет значение, при котором величина риска R попадает на границу разделения областей допустимых и недопустимых состояний NT диаграммы безопасности.

$$d \int_{\Delta t} p(t)dt = R \quad (11)$$

$$d\Delta t p_o = R, \text{ если } p(t) = p_o = \text{const} \quad (12)$$

$$\Delta t = R / p_o d \quad (13)$$

Дефицит безопасности определяется для состояний с величиной риска R , находящихся в недопустимой области диаграммы безопасности:

$$DR = (p_g, d_g; p, d) = R_g - R \quad (14),$$

где значения p_g и d_g соответствуют границе области допустимых состояний. Поскольку граница области допустимых состояний является множеством точек, то величина дефицита безопасности зависит от выбора точки (p_g, d_g) на диаграмме. Выбор точки на границе области допустимых состояний, фактически, определяет стратегию устранения дефицита безопасности:

$$- DR = \min_{p_g, d_g} (DR(p_g, d_g; p, d)) \quad (15), \text{ где точка } (p_g, d_g) \text{ соответствует минимальному расстоянию до границы области недопустимых состояний (NT);}$$

- $DR = DR(p, d_g; p, d)$ (16), где точка (p, d_g) соответствует устранению дефицита безопасности за счет снижения последствий ИС без изменения значения вероятностной компоненты риска;

- $DR = DR(p_g, d; p, d)$ (17), где точка (p_g, d) соответствует устранению дефицита безопасности за счет снижения вероятности ИС без изменения значения компоненты последствий.

Эффективность модернизации может быть определена как величина устраняемого (компенсируемого) дефицита безопасности:

$$DR(p_o, d_o; p_1, d_1) = R_o - R_1 \quad (18),$$

где R_o и R_1 - значения риска до и после модернизации. На диаграмме 3 эффективность модернизации - это расстояние между точками с координатами (p_o, d_o) и (p_1, d_1) .

Таким образом был предложен метод количественного определения:

- дефицита безопасности, соответствующего отступлениям от требований НД;
- интервала времени, в течение которого допускается эксплуатация энергоблока при наличии отступлений от требований НД (предельно допустимое время).
- устраняемого (компенсируемого) дефицита безопасности, как количественной характеристики эффективности модернизации.

Литература

1. “Положение о лицензировании в области использования атомной энергии”, Постановление правительства №865, 14.07.1997 г.
2. Гордон Б. Г., Чулкова Т. Ю., Линии защиты – методика оценки безопасности действующих атомных станций.- Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 3, с. 31-40.
3. Гордон Б. Г., Чулкова Т. Ю., Методы экспертной поддержки лицензирования действующих АС.- Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, вып. 1, с. 51-57.
4. Васекин В. Н., Истомина Н. Н., Чулкова Т. Ю., Экспертная методика оценки безопасности эксплуатации энергоблоков АЭС. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, вып. 1, с. 58-64 .
5. Бава Д., Батчер П., Москалев А. И др. Рецензия Отчета по анализу безопасности Игналинской АЭС. Официальное резюме. Отчет RISKAUDIT № 74, январь 1997.
6. Отчет по углубленной оценке безопасности 1-го энергоблока Курской АЭС.
7. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97, НП-001-97. –М., 1999.
8. Потенциальное облучение и ядерная безопасность, INSAG-9, МАГАТЭ, Вена, 1996.
9. Воронин Л. М., Засорин Р.Е, Кайоль А. и др. Безопасность атомных станций. Справочник. EDF – Росэнергоатом, 1994 г.