

В. Г. Здановский, д-р техн. наук, профессор  
(ГУ «НИИПБОТ»)

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

В статье дана краткая характеристика проблем безопасности действующих атомных электростанций (АЭС) и основных направлений её обеспечения [1]. Одним из важнейших методов оценки ядерной безопасности АЭС, включая теоретическое обоснование и разработку конкретных мероприятий, по мнению большинства специалистов по надёжности и безопасности АЭС, а также ведущих разработчиков и контролирующих органов, таких как МАГАТЭ, СКБ «Гидропресс», НИИ атомной энергии им. И. В. Курчатова и др., является **вероятностный анализ безопасности** (далее – ВАБ). Оценка вероятности выполняется на основе разложения возможного отказа ядерной паропреобразующей установки (далее – ЯППУ) на независимые составляющие.

Применяемые методы позволяют получить оптимальную оценку уровня безопасности проекта АЭС и имеют существенные преимущества, состоящие в следующем:

- углубленное изучение технологии – возможность адекватного оценивания поведения оборудования и действий персонала при нормальном режиме эксплуатации и при авариях;
- объёмный и всесторонний анализ получение целостной оценки надёжности ЯППУ и уровня её безопасности.

Наиболее полно методика ВАБ освещена в [2].

ВАБы АЭС представляют собой современный уровень науки и техники и нормативные документы атомной энергетики требуют их выполнения. ВАБ является одной из основных частей «Отчёта по безопасности» и должен проводиться не реже чем через 10 лет. Существует серия руководств МАГАТЭ по выполнению ВАБ АЭС, а также относительно опыта решения основных задач ВАБ [3].

ВАБ в сочетании с анализом запроектных аварий (далее – ЗПА) является основой для:

- отбора и оценки сценариев аварий, для предотвращения и минимизации последствий которых необходима разработка руководств и инструкций по ликвидации, в т.ч. и ЗПА;
- разработки мероприятий, направленных на повышение безопасности энергоблоков и АЭС в целом, исходя из влияния систем/оборудования АЭС на безопасность.

На рис. 1 дана обобщённая схема, в которой указаны основные элементы ВАБ, подлежащие изучению и анализу, а также связи между ними.



Рис. 1. Обобщенная схема ВАБ

Приведем краткие определения основных понятий безопасности в том виде, в каком они приводятся разработчиками [2].

**Метод вероятностной оценки риска (Probability Risk Assessment – PRA)** позволяет выделять и характеризовать возможные риски и оценивать их количественно (вероятностно).

Метод позволяет оценить:

- риск радиационного загрязнения (в частности, выброс радиации АЭС);
- электрический риск (к примеру, электрический удар);
- тепловой риск (например, тепловой взрыв);
- химический риск (выброс, например, ядовитых химикатов).

Определение:

*Риск – это потенциал потерь или повреждения подвергающегося риску объекта (процесса).*

Метод измеряемого риска (т. е. ВАБ – PRA) позволяет ответить на следующие вопросы:

- что может идти неправильно?
- правдоподобно ли это?
- каковы последствия?

**Безопасность** представляет собой приемлемый уровень риска относительно выгод, полученных из деятельности (активности) подвергающегося риску объекта.

**Вероятность.** Рассмотрим одну из двух существующих общих интерпретаций вероятности – частотную вероятность, когда вероятность случая (события  $A$ ) определена формулой

$$P(A) = \lim(X/n), \quad (1)$$

где  $X$  – число случаев (событий  $A$ ), происшедших из числа  $n$  повторенных испытаний, которые стремятся к бесконечности. Для фиксированного  $n$  величина  $P(A)$  – относительное частотное появление случая (события)  $A$ . Следовательно, увеличение числа испытаний  $n$  улучшает оценку вероятности  $P(A)$ .

**Надежность (Reliability)  $R$**  – вероятность того, что система отработает удовлетворительно (т. е. безопасно) соответствующий (определенный) период времени (24 ч или количество циклов) и в определенных условиях работы.

**Ненадежность (Unreliability)  $U$**  – дополнение надежности, т. е. вероятность того, что система будет неработоспособной в обозначенный период времени и в установленных условиях эксплуатации:

$$U = 1 - R \quad (2)$$

**Готовность** (неготовность) Availability (Unavailability)  $A$  – вероятность того, что система (компонент) является работоспособной и может выполнять свою функцию в момент (точечного) времени в заданных условиях работы. Для каждого момента времени есть значение готовности  $U$ :

$$U = 1 - A. \quad (3)$$

**Аварийная последовательность** или путь протекания аварии определяется нормальным функционированием или отказами систем и элементов АЭС в процессе её развития, а также действиями эксплуатационного персонала.

Далее рассмотрим определение еще одного понятия, которое наиболее часто встречается в ВАБ.

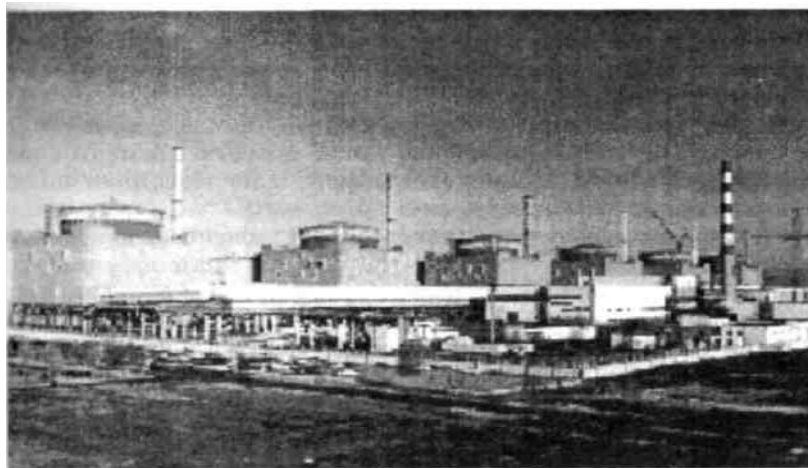
**Функция безопасности** – специфическая конкретная цель (безопасность) и действия, обеспечивающие ее достижение, направленные на предотвращение аварии или минимизации ее последствий.

Функции безопасности определяются для РУ в целом или для конкретных систем. основополагающие функции безопасности для всех ЯППУ и всех режимов работы формулируются так:

- контроль и управление реактивностью;
- обеспечение охлаждения активной зоны реактора;
- локализация и надежное удержание радиоактивных продуктов.

Примерами функций безопасности являются также аварийная остановка реактора, аварийное охлаждение реактора, отвод тепла к конечному поглотителю, удержание радиационных продуктов и др.

На рис. 2 представлена самая большая в Европе Запорожская АЭС, состоящая из 6-ти энергоблоков мощностью 1000 МВт с реакторной установкой (РУ) В-320 – типового атомного энергоблока украинских АЭС.



*Рис. 2. Общий вид Запорожской АЭС*

Ошибки в действиях обслуживающего персонала АЭС или механические отказы оборудования рассматриваются ВАБ как **случайные процессы**. Случайный процесс может быть дискретным или непрерывным. Процесс называется **случайной последовательностью (процессом с дискретным временем)**, если независимая переменная может принимать только четное множество значений. Такое определение случайного процесса предполагает существование распределения вероятностей для функционального пространства его реализаций. Каждая реализация  $x(t) = X(t)$  образует элементарное событие (выборочную точку в функциональном пространстве).

В ВАБ независимой переменной  $t$  служит время, а величина  $x(t)$  означает состояние физической системы. Большая часть случайных процессов, рассматриваемых в ВАБ, является отдельным классом случайных процессов, называемых **марковскими процессами**. **Марковский процесс** – это случайный процесс, обладающий тем свойством, что его поведение после момента времени  $t$  зависит только от его значения в этот момент и не зависит от поведения процесса до момента времени  $t$ . Марковские случайные последовательности часто называют **цепями Маркова**. Вероятности конечных состояний оцениваются по методике, основанной на марковской модели безопасности [2].

В ВАБ задача обеспечения безопасности решается построением *деревьев событий, деревьев отказов* и их анализом. Деревья событий (далее – ДС) – это логические представления значительных стационарных реакций на инициирующие (исходные) события.

Анализ деревьев отказов (далее – ДО) систем является наиболее общим методом, используемым для представления логики отказов систем АЭС. Данный метод представляет собой дедуктивный анализ отказов, который можно просто описать аналитически. Можно определить нежелательное состояние системы и затем анализировать её с точки зрения окружающих условий и эксплуатации для выявления всевозможных путей, по которым может реализоваться нежелательное событие. ДО представляет собой графическую модель различных параллельных и последовательных сочетаний отказов, которые приведут к реализации заранее определенного нежелательного события. Отказами могут быть события, связанные с выходом из строя элементов системы, ошибками персонала, неготовностью оборудования вследствие технического обслуживания, которые могут привести к нежелательному событию.

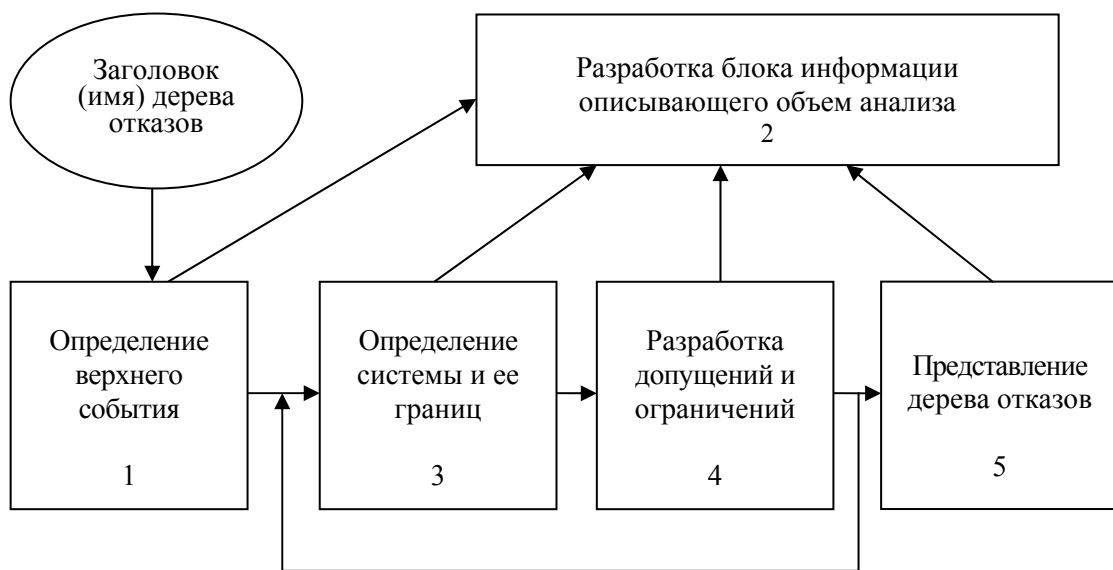
ДО представляют собой математические вероятностные модели систем, учитывающие возможные отказы всех элементов, входящих в систему, их взаимосвязь и взаимозависимость, и позволяют рассчитать вероятность отказа системы на основе известных характеристик

надежности ее элементов. Они состоят из базисных событий, соединенных логическими элементами. Следовательно, ДО – логические представления вероятных отказов систем, которые могут происходить и приводить к нежелательному событию.

Целями использования деревьев отказов являются:

- выявление путей, приводящих к отказу системы;
- изучение модели системы путем получения информации об уязвимых местах моделируемой системы, взаимозависимости между отказами её элементов и определения вероятности отказа системы.

Процесс разработки дерева отказов (ДО), состоящий из пяти этапов, представлен на рис. 3.



*Рис. 3. Процесс разработки дерева отказов*

Основные положения и правила построения деревьев отказов следующие:

- при построении ДО используется концепция мгновенного отказа, т. е. каждое событие представляется происходящим в данный момент;
- сначала обращаем внимание на необходимые и достаточные причины возникновения верхнего события, затем причину этой причины и далее последовательно по шагам.

Для разработки ВАБ большое значение имеет понятие ЗПА – аварии, вызванной не учитываемыми проектной аварией (ПА) исходными событиями или сопровождаемой дополнительными по сравнению с ПА отказами систем безопасности сверх единичного отказа. ЗПА может быть следствием реализации ошибочных решений и действий персонала, которые могут привести к тяжелым последствиям. Их уменьшение достигается управлением аварией и/или реализацией мероприятий по защите персонала и населения. В качестве ЗПА выбираются аварии,

которые могут привести к тяжелым радиационным последствиям, при этом по результатам ВАБ выбираются аварии, вероятность которых выше нормативной ( $10^{-7}$  1/реакторо-год).

Повышение безопасности АЭС требует анализа в ВАБ не только эксплуатационных режимов и проектных аварий, но и ЗПА. Такие требования налагаются в целях разработки и обоснования мероприятий, направленных на минимизацию ущерба при маловероятных исходных событиях аварий или при наложениях на проектные исходные события дополнительных отказов систем и оборудования.

Общими положениями по безопасности АЭС (ОПБ-88) определяется необходимость анализа ЗПА при проектировании РУ и АЭС в целом.

Современный подход к управлению ЗПА включает в себя следующее:

- определение характерных её признаков;
- выявление признаков различных фаз аварийного процесса, которые различаются состоянием активной зоны РУ;
- выделение ключевых физических процессов на каждой фазе аварии;
- разработку стратегии управления ЗПА.

Далее приведем примерный перечень запроектных аварий, а именно:

1. Полное обесточивание (потеря питания переменным током).
2. Малые течи различного типа, в т. ч. с полным обесточиванием АЭС.
3. Средние и большие течи различного типа, в т. ч. с отказом отдельных систем защиты реактора.
4. Отказ аварийной защиты реактора.
5. Потеря питательной воды с отказом подпитки парогенераторов.
6. Течь из 1-го во 2-й контур и повреждение паропроводов.

Расчеты ЗПА должны выполняться по современным кодам, при этом должна быть представлена информация по верификации применяемого кода.

Анализы должны быть выполнены таким образом, чтобы можно было на их основании разработать способы управления ЗПА, способы и время вмешательства оператора, предусмотреть дополнительное оборудование.

Согласно методике МАГАТЭ [2] наиболее важные результаты исследования ВАБ включают математические ожидания частоты повреждения активной зоны и показатели их неопределенностей, а также перечень доминирующих аварийных последовательностей совместно с точечными оценками и характеристиками неопределенностей соответствующих частот.

Анализ неопределенности устанавливает изменение вероятности верхнего события системы, следующей из неопределенности в вероятностях базисного события. Поскольку модель ВАБ только стремится отобразить реальность, неизбежно существование упрощений, допущений и идеализации сложных процессов и явлений. Результатом этих упрощений и идеализации будут неопределенности в итоговых результатах, которые необходимо оценивать.

Можно выделить основные категории источников неопределенностей в моделях, к которым относятся полнота и адекватность моделирования, а также неопределенность исходных параметров.

**Полнота и адекватность моделирования.** Главным назначением модели ВАБ является оценка возможных сценариев (последовательностей событий), которые могут привести к нежелательным последствиям – повреждению активной зоны. Однако нет гарантии, что этот процесс всегда будет полным и что все возможные сценарии выявлены и оценены. Этот недостаток полноты приводит к неопределенности в результатах и в выводах, которые трудно проанализировать или определить количественно. В качестве примера рассмотрим ИС одну из тяжелейших аварий, которые имели место на 4-ом энергоблоке Чернобыльской АЭС и на японской АЭС «Фукусима-1» – **«полное обесточивание АЭС».**

**Обесточивание АЭС** – это потеря электропитания переменным током или собственных нужд блока от внутренних источников (турбогенератора) и от энергосистемы. Обесточивание приводит к нарушению нормального отвода тепла по первому и второму контурам РУ вследствие отключения главных циркуляционных насосов (ГЦН) первого контура, остановки турбины и невозможности отвода тепла в конденсатор турбины.

Все случаи обесточивания можно разделить на две категории в зависимости от времени, в течение которого возможно восстановление электроснабжения от энергосистемы: до 1 часа и свыше 1 часа. Длительное обесточивание связано с повреждением крупного оборудования: взрывы трансформаторов, повреждение опор линии электропередачи и т. п. Причинами длительного обесточивания могут быть пожары, ураганы, смерчи, землетрясения.

ОКБ «Гидропресс» проведен расчет полного обесточивания АЭС. Приведем здесь некоторые результаты этих расчетов. Как уже отмечено, полное исчезновение переменного тока на станции приводит к отключению основных потребителей собственных нужд: ГЦН, питательных насосов, подпиточных насосов первого контура, системы регулирования давления в компенсаторе, системы сброса пара второго контура и других систем. В



этом случае АЭС переходит на электроснабжение от дизель-генераторов, мощность которых предназначена только для питания аварийных объектов жизнеобеспечения.

Анализ результатов расчетов показал, что надежное охлаждение активной зоны реактора обеспечивается выбегом ГЦН и естественной циркуляцией теплоносителя. Срабатывание аварийной защиты реактора приводит к снижению параметров первого и второго контуров, в результате чего давление второго контура поддерживается постоянным, а давление первого контура возрастает незначительно. Условия охлаждения активной зоны реактора в режиме обесточивания АЭС будут не хуже, чем в режиме отключения всех ГЦН.

**Потенциальные опасности обесточивания.** Полная потеря электроэнергии приводит к ситуации, когда запас воды в первом контуре не может быть сохранен и существует опасность течи в нем, вызванной повреждением уплотнений насосов контура; остаточное тепло не может быть отведено, так как работа вспомогательных систем питательной воды в ПГ зависит от подачи электроэнергии; реактор не может регулироваться после разрядки батарей. В случае обесточивания станции необходимо определить средства для:

- сохранения целостности первого контура;
- впрыска борированной воды в первый контур;
- повторного заполнения ПГ;
- обеспечения параметров системы регулирования реактора;
- восстановления источников питания.

**Анализ функций безопасности основных систем, которыми являются:**

1. Управление реактивностью (обеспечение подкритичности РУ).
2. Обеспечение электроэнергией механизмов систем безопасности (СБ).
3. Отведение остаточного и запасенного тепла по второму контуру.
4. Поддержание целостности границ первого и второго контура.
5. Отвод остаточных тепловыделений по первому контуру.

**В ВАБ также проводится анализ значимости и чувствительности** для формирования практических выводов по показателям надёжности АЭС и её РУ. В силу специфичности этих понятий они детально не рассматриваются.

**Важнейшим элементом ВАБ является анализ надёжности персонала.** Опыт ядерной энергетики свидетельствует о том, что ошибки персонала существенно влияют на вероятность возникновения аварийных ситуаций на АЭС. Поэтому проблеме ошибок персонала следует уделять не меньшее внимание, чем анализу аварийных ситуаций с отказами оборудования.

Моделирование поведения человека является наиболее сложным при проведении ВАБ. По мере роста автоматизации и совершенствования взаимодействия человек – машина вклад персонала в частоту повреждения активной зоны уменьшается, хотя и остается существенным. Так на старых АЭС США ошибки персонала достигали 80 %, а на современных АЭС – ниже 30 % [4]. Такой прогресс стал возможным благодаря многочисленным научным исследованиям поведения человека-оператора.

Наиболее фундаментальными научными работами по исследованию *человеческого фактора* – Human Factor (HF) являются работы американских ученых, в частности [5]. Важность этих работ состоит в том, что исследователям предоставляется возможность учитывать вероятности выполнения операций по минимизации последствий аварий в условиях конкретной АЭС, включая действия человека по восстановлению работоспособности оборудования в качестве базисных событий в вероятностных моделях ВАБ – ДО и ДС.

В отчетах по анализу безопасности украинских АЭС [6] приводятся данные о величине человеческого фактора в инцидентах и нарушениях, составляющих 25 % и повторяющихся на протяжении последних лет. При этом установлено, что в 73 % этих нарушений сказывается отрицательная роль неблагоприятных психологических качеств человека. Изучение специфики труда различного рода специалистов в энергетике показало, что труд оператора АЭС относится к деятельности с высокой психологической нагрузкой. Кажущаяся монотонность обстановки, медленное изменение показаний приборов приводит к расстройству сознания, росту напряженности и утрате бдительности. Существует специфика проблемы повышения надежности работы человека в условиях АЭС, т. к. это условия повышенного риска. Особое значение имеет высокая ответственность за каждое решение, необходимо в каждый момент иметь полное представление о состоянии технологического процесса управления и быть готовым к точным и своевременным действиям.

Обычно ВАБ учитывает лишь простые ошибки (оплошности), связанные с невыполнением процедур. Более сложные ошибки, число которых считается практически неограниченным, очень сложно промоделировать и оценить количественно. Тем не менее дополнительный учет исполнительских ошибок, который был проведен в последние годы французским ВАБ, дает высокий показатель ошибок персонала – до 80 %.

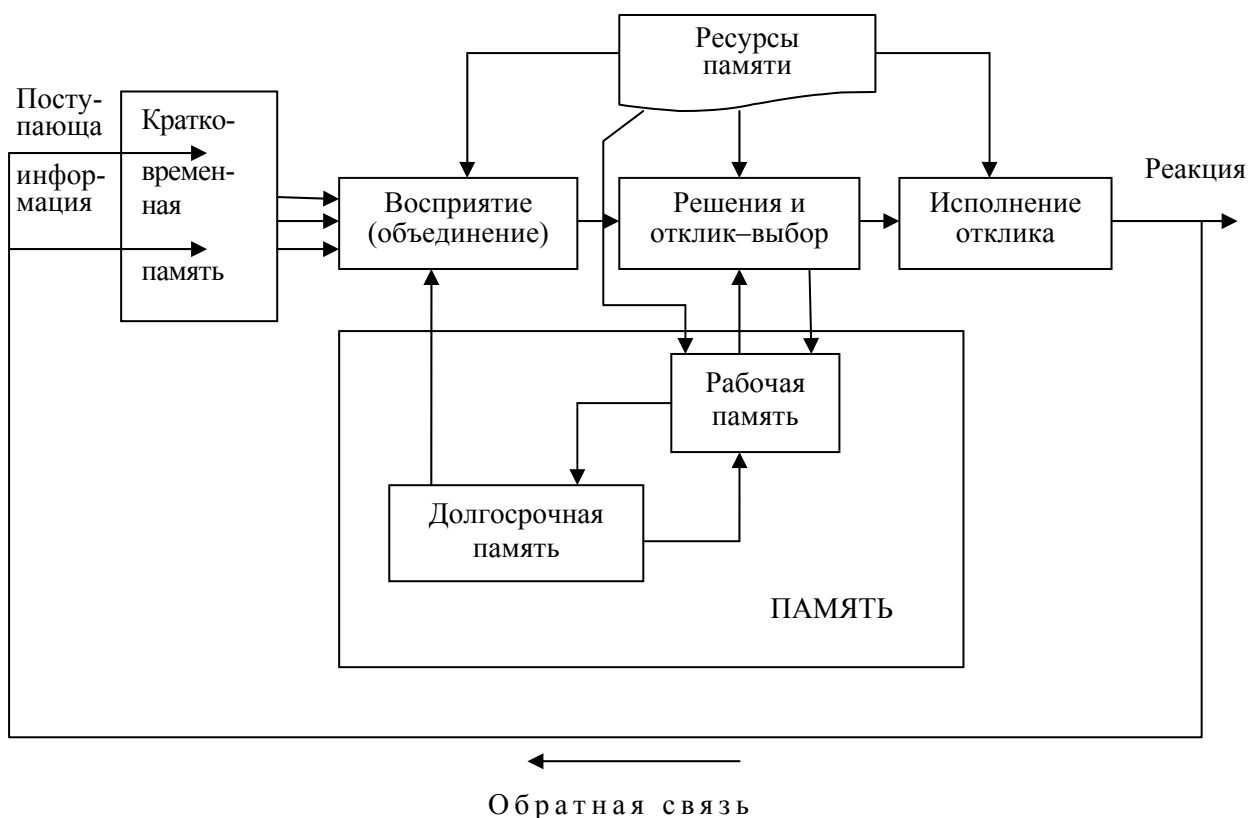
Одним из наиболее ответственных звеньев системы управления и обеспечения безопасности является оператор – её регулятором и одновременно субъектом управления блока АЭС. Оператор становится центральным звеном системы управления, выполняющим наиболее

ответственные задачи: восприятие и ретрансляцию информации, поступающей в той или иной форме от управляемого объекта; анализ информации и принятие решения, т.е. выработку управляющей информации; программирование работы и контроль за работой всей системы или ее частей, исполнение той или иной команды [7].

Этот объем задач может быть выполнен при обучении оперативного персонала АЭС в учебно-тренировочных центрах (УТЦ). Одним из важных моментов обучения в УТЦ является отработка действий оператора при переходных процессах, при скоростях процесса, начиная от возникновения нарушения до появления необратимых изменений в технологическом процессе.

**Ошибка персонала** – единичное непреднамеренное неправильное воздействие на управляющие органы или единичный пропуск правильного действия или тоже самое при техническом обслуживании оборудования и систем, важных для безопасности. **Ошибочное решение** является логической ошибкой оператора, влекущей за собой целую последовательность неправильных действий, составляющих алгоритм ошибочного решения, в результате которого персонал и оборудование подвергаются риску.

Процесс обработки информации человеком, изображенный на рис. 4, положен в основу поведенческой модели человека для моделирования на компьютерах.

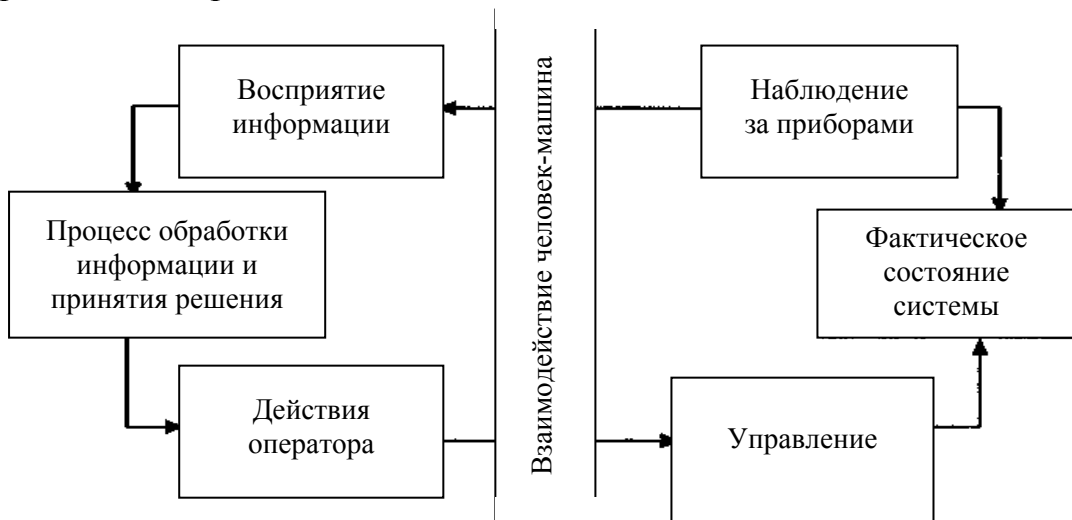


*Рис. 4. Блок-схема обработки информации сознанием человека*

Блоками на рисунке выделены процессы, соответствующие физическим особенностям мозга человека и имеющие реальные кибернетические модели. Информация через пять органов чувств человека поступает в блок кратковременной памяти, где происходит ее объединение в виде процесса восприятия. Затем через блок выбора она поступает в память. При моделировании процесса выработки решения учитываются реальные характеристики памяти и ограничения. Человек может воспринимать и работать с ограниченным количеством информации. Если число поступающих сигналов велико, происходит избирательность восприятия информации.

Изучены различные внутренние и внешние факторы, способствующие или мешающие процессу восприятия, и элементы «контекста». К внутренним факторам, определяющим процесс принятия решения и, следовательно, действия оператора, относятся: умственные способности, способности удерживать в памяти информацию, знания и навыки, особенности реакции. Эти факторы индивидуальны. Влияние стресса чаще всего также относят к внутренним факторам.

Для анализа путей возникновения ошибок оператора важное значение имеет представление человеко-машинной системы, изображенной на рис. 5.



**Рис. 5. Структура системы человек – машина**

Из рис. 5 следует, что пути ошибки не всегда зависят от человека, а зачастую происходят от неправильных измерений, индикации, неэффективного управления. Система представления информации человеку и возможности управления (организация органов управления) в технике имеет специальный термин – интерфейс (Human-Machine Interface – НМІ). Очевидно, что эффективность управления и количество ошибок операторов зависят от интерфейса. Эта система условно изображена двумя вертикальными линиями.

Информация об анализе надежности персонала является частью основного отчета по ВАБ. Эта информация относится к исходным

данным, методам и результатам анализа. Необходимо рассмотреть каждое событие с ошибкой персонала, отобранное для углубленной проработки.

### *Выводы*

**Использование результатов ВАБ для модернизации АЭС.** Недостатки проектов АЭС, выявленные проведенными расчётами ВАБ, а также проявившиеся в процессе накопления опыта эксплуатации, оформляются в виде мероприятий по модернизации энергоблоков АЭС с РУ ВВЭР-1000/320 [8], которые постоянно дополняются с учётом появления новых информационных материалов и нормативно-технических требований. Они успешно выполнены на всех 12 реакторах этого типа, установленных на АЭС Украины, и имеет место постоянное совершенствование их систем безопасности. Процесс реконструкции не отличается от того, который выполняется на действующих АЭС во всём мире. Дальнейшее усовершенствование ВАБ, разработка и внедрение дополнительных рекомендаций и мероприятий по повышению безопасности и надёжности АЭС позволяют утверждать, что действующие АЭС Украины по всем параметрам безопасности соответствуют международным стандартам. Они не только не представляют угрозы для персонала и населения, а практически экологически чистые, являясь одновременно надёжным и безопасным источником энергообеспечения страны.

### Список литературы

1. Здановский В. Г. Аспекты промышленной и радиационной безопасности атомных электростанций. // Проблеми охорони праці в Україні: збірник наукових праць. – К., 2013. – № 26. – С. 24–32.
2. Швыряев Ю. В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения. – М. : ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1992.
3. МАГАТЭ. Руководство по проведению вероятностного анализа безопасности атомных станций: Отчёт. – М., 1990.
4. Векслер Л. М. Методологические проблемы вероятностного анализа безопасности АЭС // Атомная техника за рубежом. – 1995. – № 1.
5. Human Reliability and Safety Analysis System Data Handbook. David I. Gertman, Harold S. Blakman. N-Y. 1995.
6. Статистический и технологический анализ нарушений на АЭС Украины. Отчёты ГНТЦ ЯРБ за 1996–2002.
7. Сааков А. Е. Подготовка эксплуатационного персонала АЭС. – М. : Энергоиздат, 1997.
8. Программа модернизации энергоблоков АЭС Украины с реакторами ВВЭР-1000/В-320. Госкоматом. – К., 1990.

*Дата подання статті до збірника 10.02.2014*