

## Общепромышленный подход и подход при использовании атомной энергии к безопасности

О.М. Ковалевич (НТЦ ЯРБ), В.Г. Веземский (ВНИИАЭС)

### 1. Введение

Возрастающее количество тяжелых техногенных аварий в стране с увеличением числа жертв и материального ущерба, когда затраты на компенсацию ущерба становятся сравнимы с приростом внутреннего валового продукта страны [1], вызвали в последние годы пристальное внимание государства и науки к проблеме тяжелых аварий и катастроф. В рамках комплекса проектов [1], входящих в Федеральную научно-техническую целевую программу (ФНЦП), много сделано по разработке единых общепромышленных подходов к анализу причин появления экстремальных ситуаций при эксплуатации сложных высокорисковых технических систем. При этом правомерно ставить вопрос о создании единой Государственной системы безопасности. Основные направления такого универсального подхода ко всем потенциально опасным объектам и их характеристики изложены в [2] группы авторов под руководством члена-корреспондента РАН Н.А. Махутова, что является одним из основных результатов деятельности по указанной выше федеральной программе.

В статье поставлена задача рассмотреть изложенные в [2] подходы и сравнить их с развиваемыми и уже реализуемыми при использовании атомной энергии. Поскольку номенклатура потенциально опасных объектов атомной промышленности весьма обширна, разнообразна по потенциальной опасности, срокам их сооружения и нынешнему состоянию, то в качестве характерных представителей атомной промышленности целесообразно остановиться на атомных станциях (АС), как одних из наиболее распространенных и потенциально опасных и по вложениям радиоактивности, и по напряженности параметров работы в условиях нормальной эксплуатации [3]. Такой выбор представляется обоснованным, так как АС имеют наиболее совершенную концепцию обеспечения безопасности и реальную нормативную базу.

Суть сравнения сводится к следующему (рис. 1):

- 1) выявить области требований, где АС не удовлетворяют общим требованиям [2] (область 1);
- 2) обнаружить области неполноты общих требований [2] по сравнению с АС (область 2);
- 3) обозначить области 3 и 3', формально признающиеся совпадающими, но в отдельных частях имеющие разную степень реализации как для АС, так и, вероятно, еще меньшую в большинстве отраслей промышленности.



Рис. 1. Схематическое изображение сравнения рассматриваемых подходов обеспечения безопасности

### 2. Основные моменты

Принципиальной новизной подхода, изложенного в [2], авторы считают взаимосвязку функционирования объектов, операторов и среды обитания, при реализации которого будут использованы семь основных методов решения поставленных задач. Ниже мы остановимся на этих сформулированных методах, комментируя состояние данного подхода в атомной энергетике (АЭ).

**(1) Формирование иерархии и классификации аварийных и катастрофических ситуаций по степени их тяжести, по уровню ущербов и рисков.**

В этом аспекте следует различать два момента: первый – место АС в общей иерархии всех потенциально опасных объектов, второй – иерархия внутри самих АС. Создание иерархии среди всех потенциально опасных объектов – далеко не простая задача, если даже вообще выполнимая, так как слишком много показателей и обстоятельств при аварии характеризует каждый объект. По крайней мере, абсолютно невозможно на сегодняшний день ранжировать однозначно потенциально опасные объекты на основе одного-двух количественных показателей. Федеральный закон "О техническом регулировании" поставил задачу дифференцировать объекты по "степени риска". В [3, 4] показано, насколько решение такой задачи неоднозначно и потребует немало усилий. Вместе с тем АС стоят одними из первых в ряду такой иерархии (наряду, например, с крупными гидротехническими сооружениями, крупными химическими заво-

дами и др.). Внутри класса АС далеко не одноликая картина из-за времени сооружения и существовавших на момент создания требований к типу реактора, использованию освоенных технологий и т.п. Вопрос о будущих АС также должен быть учтен.

**(2) Разработка критериальной базы для наиболее тяжелых аварий и обобщенной системы запасов по безопасности, живучести, надежности, ресурсу и прочности.**

Не очень понятен неоднократно используемый авторами [2] комплекс слов "безопасность, живучесть, надежность, ресурс, прочность" по вкладываемому в этот комплекс смыслу в каждое из этих слов, их взаимосвязи и иерархии.

Что касается критериев для тяжелых аварий, то АС имеют определенное количество таких критериев (допустимые температуры тепловыделяющих элементов, свойство корпуса реактора против разрушения, прочность и плотность защитной оболочки, введение планов по защите населения и др.). Но нельзя сказать, что разработаны и внедрены все критерии, препятствующие развитию тяжелой аварии (например, вопросы прочности и ресурса элементов под нагрузками).

**(3) Относительно построения математических моделей и уравнений для описания условий возникновения и развития тяжелых аварий и соответствующее развитие экспериментальных методов для выбора определяющих параметров и предельных состояний.**

Разработке математических моделей и соответствующих программных средств в АЭ уделяется большое внимание, хотя по масштабу она не может сравниться с объемом исследований в западных странах. Больше внимание всегда уделялось вопросам прочности и теплогидродинамическим процессам, меньшее – вопросам развития тяжелых аварий, включая вопросы поведения защитных оболочек, выхода и распространения радиоактивных продуктов, определения предельных состояний различных элементов АС, оценки ожидаемого ущерба и др. За последние десятилетия уровень исследований из-за недостатка средств сократился, и все больше приходится использовать зарубежные источники десяти-двадцатилетней давности. Адекватность использования зарубежных методик для отечественных АЭС не доказана полностью, опять же из-за недостатка средств или неполноты предоставляемой зарубежной информации.

Уже более десяти лет при НТЦ ЯРБ работает Совет по аттестации программных средств (ПС), используемых для обоснования безопасности объектов атомной энергии. Совет имеет секции по направлениям (нейтронная физика, теплогидродинамика, прочность, вероятностный анализ безопасности (ВАБ), радиационная безопасность, ядерный топливный цикл). Создана многоступенчатая открытая система с привлечением на постоянной основе более 100 компетентных специалистов как в Совет, так и в секции из разных организаций, и привлекается приблизительно столько же экспертов при рассмотрении конкретных ПС. К середине 2004 г. аттестовано около 150 ПС. Расширению перечня с покрытием незааттестованных проблем препятствует опять же недостаток финансовых средств для разработки требуемого верификационного отчета и оплаты экспертов. В этой связи целесообразно задуматься при создании государственных норм обеспечения безопасности, упомянутых в [2], об организации подобного общегосударственного органа для рассмотрения проблем, важных для многих отраслей промышленности (прочность, надежность, риск и др.), оставляя специфические вопросы для соответствующих отраслей. В процессе прохождения аттестации ПС вскрываются "белые пятна" в научно-техническом обосновании и нормативном обеспечении, что дает импульс к их устранению.

**(4) Развитие теории и принципов оперативной диагностики тяжелых аварийных ситуаций, создание макетов диагностических систем.**

Оперативная диагностика тяжелых аварийных ситуаций в АЭ – одна из задач систем контроля и управления, призванная информировать о нарушениях пределов безопасности. Нельзя сказать, что она перекрывает весь диапазон необходимых параметров. Не заслуживает доверия подход к диагностике состояния элементов, работающих под давлением, и к определению их ресурса. Относительно макетов новых диагностических систем сказать что-либо трудно.

**(5) Построение обобщенных систем раннего предупреждения тяжелых аварий и катастроф в системах "человек-машина-среда".**

Вероятно, надо изменить последовательность на "среда-машина-человек". Воздействия внешней "среды" на объект должна регистрировать и ослаблять "машина", передавая информацию "человеку", который, в свою очередь, должен принимать дальнейшие защитные и ослабляющие действия.

Для АС такая схема существует, правда, не по всем возможным параметрам. В сейсмических районах выдвигаются специальные требования к основаниям, зданиям и оборудованию. Реактор ВВЭР-1000 и оборудование первого контура проектируются на землетрясения в 10 баллов для возможности реализации проекта в любых сейсмических районах внутри страны и за рубежом. Имеется система физической защиты против несанкционированного проникновения на АС с террористическими целями, эффективность которой серьезно не изучалась и вряд ли является высокой.

**(6) Развитие принципов и норм продления ресурса безопасной эксплуатации высокорисковых объектов.**

Что касается ресурса безопасной эксплуатации объектов, то надо говорить не только о его продлении больше первоначально намеченного срока. Необходимо постоянное внимание к этому вопросу во время назначенного срока эксплуатации, поскольку предусмотреть все реальные условия при проектировании, которые влияют на ресурс, невозможно, и необходим постоянный мониторинг воздействий на оборудование и его состояние. Под понятием "ресурс" исторически всегда понималась оценка состояния оборудования, находящегося под давлением. Но под это понятие должны подпадать и другие важные для безопасности системы (машины, система управления, строительные сооружения и др.).

С начала 2000-х годов АЭ начала проходить этот путь с блоками первого поколения, построенными в начале 60-х годов прошлого века. Основное внимание было привлечено к корпусу реактора, поскольку нейтронный поток со временем приводит к изменению свойств металла (охрупчиванию) и может вызвать мгновенное разрушение. Разработанная и реализованная на некоторых блоках методика отжига корпуса позволяет продлить эксплуатацию корпуса на несколько лет. Долгосрочные прогнозы эффекта от отжига затруднительны. Кроме корпуса, большими местами для прогнозирования ресурса являются элементы первого контура и парогенератор. Многообразие воздействий на элементы этого оборудования, недостаточный мониторинг и регистрация имевших место воздействий, по-видимому, не всегда позволяют убедительно доказывать их надежность даже с учетом новых воззрений на усталостную сопротивляемость.

### **(7) Разработка нормативно-технических основ повышения безопасности и снижения рисков.**

Нормативная база в обеспечение безопасности в АЭ начала создаваться вместе с ее развитием. В 70-х годах появились первые нормативные документы по прочности (превосходящие по уровню требований общепромышленные), по ядерной и радиационной безопасности. После Чернобыльской аварии по указанию директивных органов был создан (1987 г.) Сводный перечень правил и норм в атомной энергетике, который объединил наработанные к тому времени общегосударственные и отраслевые документы как основы деятельности Госатомнадзора СССР. Федеральный закон "Об использовании атомной энергии" потребовал создания системы федеральных правил и норм, перечень которых утверждался правительством, а сами документы – органами надзора по согласованию с другими заинтересованными ведомствами. К апрелю 2004 г. разработано и введено в действие около 60 документов<sup>1</sup> и разрабатывается еще около 20 документов.

Федеральный закон "О техническом регулировании" ввел понятие "технические регламенты", которые, наряду с рекомендательными стандартами, должны будут заменить нормы и правила. Эта непростая проблема коснется не только АЭ, но и всей атомной отрасли и всех других отраслей.

Из не затронутых в [2] проблем, которыми занимается АЭ, пока отметим необходимость обратной связи с опытом эксплуатации и четким ведением представительной базы данных о режимах, нагрузках, свойствах конструкционных материалов, нарушениях, а также вопросах, связанных с выводом из эксплуатации объектов.

### **3. Совокупность и взаимосвязь понятий "риск", "безопасность", "надежность", "ресурс", "живучесть", "прочность"**

В [2] неоднократно появляется набор этих терминов с не очень понятной иерархией и взаимосвязью и выделением главного ключевого понятия. Принятая совокупность терминов определилась исторически по мере осознания необходимости всестороннего изучения и обобщения связанных с этими терминами проблем. В первую очередь, это имело место при обосновании прочности (в широком смысле) конструкций и оборудования. Естественно, что отдельные отрасли и научные школы вкладывали в указанные понятия не всегда одинаковый смысл [5]. В нынешних условиях в стремлении создать единую общегосударственную политику необходимо внести ясность в области действия и взаимосвязи указанных понятий.

В этой широко дискутируемой проблеме однозначная формулировка понятия "риск" еще не установилась, поскольку применение указанного понятия используется во многих сферах государственной, научной и бытовой деятельности (политической, финансовой, техногенной, природной и т.п.) [4]. Представляется целесообразным иметь два толкования понятия "риск" – качественное и количественное. Качественное понятие может объединить все возможные случаи использования этого понятия как наличие некоей опасности (угрозы) без попыток количественно определить этот показатель. Примененное в Федеральном законе "О техническом регулировании" определение понятия "риск" могло бы быть приемлемым для всех качественных определений понятия "риск", если заменить первое слово в определении "риска" "вероятность" на слово "возможность", а в конце определения записать "с учетом вероятности и ущерба". "Вероятность" в математике есть количественная величина, и применение этого слова в определении "риска" в упомянутом законе может толковаться как его количественное определение, что на самом деле противоречит складывающимся в науке и практике представлениям о риске как произведении вероятности неблагоприятного события на его последствия (ущерб, вред и т.п.). Неоднократно используемое в законе понятие "степень риска" явно имеет количественный характер. От определения значения "степени риска" в законе зависит целый ряд действий [6].

Декларируемый в настоящее время МЧС, РАН переход на концепцию риска как способа определения наиболее слабых мест в национальном масштабе для принятия первоочередных мер по предотвращению и ослаблению последствий аварий и катастроф, отраженного также в Федеральном законе "О техническом регулировании", еще не нашел ясного методического подхода [3]. В [2] нет четких рекомендаций на этот счет.

В АЭ распространен вероятностный анализ безопасности (ВАБ), который оценивает вероятность тяжелой аварии в виде повреждения или расплавления активной зоны реактора. Исследования возможных последствий (ущерба) только начинают проводиться. Результаты ВАБ при выполнении нормативного требования (не более  $10^{-5}$  год<sup>-1</sup> для повреждения активной зоны и  $10^{-7}$  1/год для выброса большого количества радиоактивных веществ) предполагается должны стать подтверждением достаточной безопасно-

<sup>1</sup> Эти документы относятся не только к АС, но и ко всему ядерному циклу.

сти АС, выполненной и эксплуатируемой в соответствии с нормативными требованиями детерминистского подхода. Хотя о точности таких вероятностных расчетов говорить сложно. ВАБ в атомной энергетике является упрощенной моделью "риска", когда последствия постулируются заранее, а определяется только вероятность события с такими последствиями. В [4] мы подробно говорили о таком дуализме восприятия риска различными специалистами: риск – это либо вероятность некоторого постулированного негативного события и, следовательно, борьба за уменьшение этой вероятности, либо – постулируя некоторое чрезвычайное событие, считать риском реализующиеся при этом негативные последствия (ущерб) и искать меры по их уменьшению.

Полностью избежать риска невозможно, поэтому вводится понятие "допустимый риск". В [4] мы анализируем параметры области допустимого риска как по величине вероятности чрезвычайного события, так и по масштабу последствий. Рассматриваются возможности страховых компаний воспринимать определенные страховые риски.

Данное в [2] понятие "живучесть" как способность и устойчивость функционирования при возникновении повреждений на различных стадиях развития аварий и катастроф вполне укладывается по смыслу для АЭ, если понимать под этим способность функционировать всего объекта или важных для безопасности систем<sup>2</sup>. Хотя сам термин применяется весьма редко в АЭ, но мероприятия в этой области широко используются. И в первую очередь здесь применяются защитные системы, принцип резервирования и разнообразия важных для безопасности систем, постоянный контроль таких систем.

Понятие "ресурс" в АЭ включает не только ресурс металла в нагруженных конструкциях, но и всю номенклатуру конструкций, сооружений, машин, систем управления и т.д. Этот вопрос остро возник при продлении ресурса "старых" блоков АС. Назначенный в свое время ресурс закончился (заканчивается) в начале 2000-х годов.

Понятие "надежность" на начальном этапе становления АЭ ставилось во главу угла обеспечения безопасности АС как основное условие их сооружения. Разработанные в то время нормы конструирования и проектирования АС отличались более жесткими требованиями по сравнению с общепромышленными подходами для достижения большой надежности [6, 7]. Впоследствии связанные с этим термином подходы стали использоваться, и появились требования к надежности систем АС, организован сбор нарушений и отказов для формирования соответствующей статистики. Упомянутый выше ВАБ АС не может существовать без данных о надежности. Сейчас указанный подход распространяется на другие предприятия ядерного топливного цикла.

Остается два важных вопроса – что такое безопасность и можно ли из перечисленных в заголовке понятий выделить одно (ведущее) ключевое понятие, которое включало бы остальные (ведомые), как необходимое условие достижения основного понятия.

Остановимся сначала на термине "безопасность". С ним используются два подчиненных слова: безопасность населения и безопасность объекта (в нашем случае – АС). С первого взгляда может показаться, что это тавтология, но на самом деле в итоге возникают многие недоразумения.

В АЭ основным принципом обеспечения безопасности (а именно он ставится во главу угла) является "концепция многоэшелонированной защиты" [8], которая включает в себя на разных эшелонах определенный набор действий. Основные принципы многоэшелонированной защиты: качественное и надежное оборудование как залог предупреждения отказов и нарушений, способных привести к авариям; применение защитных и локализирующих систем для ликвидации последствий проектных аварий; управление запроектными авариями с целью недопущения перерастания их в тяжелые аварии; грамотная эксплуатация и высокая квалификация персонала; мероприятия по защите персонала и населения при авариях.

Определения понятия "безопасность", как и понятия "риск", трудно перечислить, не рискуя какое-нибудь из них забыть. Это имеет место в нормативных документах любого уровня, включая федеральные законы. На наш взгляд, причина в том, что каждый автор видит проблему под своим углом зрения в соответствии с проблемой, которую он собирается рассматривать. В принципе это вполне объяснимо, если сами авторы и соприкасающиеся с этим определением "безопасность" пользователи остаются в рамках обозначенного "поля" указанного определения и не пытаются выйти за его рамки. Выход за обозначенные рамки приводит к недоразумениям или несогласиям другого автора, работающего на другом обозначенном им "поле". Но неизбежное пересечение проблем при системном анализе безопасности и вовлечение в данный процесс групп людей разных специальностей требуют каких-то точек взаимопонимания. Тем более это важно при решении вопросов национальной безопасности.

Область рассмотрения [2] и наше рассмотрение – это техногенная и природная безопасность потенциально опасных объектов. Основные недоразумения происходят здесь из-за отсутствия четкого понимания двух разновидностей ключевого термина – безопасность объекта (предприятия, процесса и т.п.) и безопасность человека (природы). Под словом "объект" мы здесь понимаем именно предприятие (процесс), а не философское понимание этого слова как предмет воздействия "субъекта". То есть на практике мы имеем картину, противоположную философскому толкованию, – объект (предприятие) по философской терминологии является субъектом (так как он воздействует на человека и природу), а человек и природа являются объектом, поскольку на них воздействует субъект (предприятие). Именно из-за неразличения этих двух понятий (безопасность объекта и безопасность человека) часто происходит путаница в определениях, в структуре изложения материала и т.п. Важно, что указанными двумя различными понятиями занимаются совершенно различные специалисты и организации. Если в первом случае это физики,

<sup>2</sup> Некоторые авторы понимают под "живучестью" способность материала (металла) сохранять необходимые свойства при образовании в нем дефектов.

химики, инженеры и др., то во втором – это медики, экологи, подразделения защиты населения при чрезвычайных ситуациях и др. Вторая группа специалистов ставит допустимые уровни негативного воздействия на человека (природу) в детерминистском или в вероятностном выражении. Первая группа создает и эксплуатирует объект (предприятие) в рамках, заданных второй группой. И часто идут ненужные споры, кто из них важнее.

Необходимо отметить следующий факт, который подтверждает нашу мысль, что все зависит от угла зрения, под которым автор смотрит на проблему. Объект (предприятие) может стать объектом в философском понимании, если в качестве субъекта рассматривать людей, которые проектируют, сооружают, эксплуатируют объект. Но это уже другое "поле", определяющее качество объекта.

Создать абсолютно безопасный объект (предприятие) при любых наборах внутренних и внешних воздействий, который не выходил бы за определенные второй группой специалистов рамки безопасности, невозможно по экономическим причинам и непредсказуемости потенциально возможных параметров воздействия. И здесь нужны ограничения, что надо учитывать при проектировании и сооружении. Таким образом, мы приходим к понятию "риска", призванному создавать рамки рассмотрения и учета парирования возможных угроз, которые общество считает необходимым предотвратить, т.е. создать рамки допустимого риска.

Продемонстрируем наши рассуждения о термине и определении "безопасность" некоторыми примерами. Естественно желание многих иметь общее определение "безопасность объекта" как отправной точки для рассуждений. Общие определения имеются (или есть возможность их создать), которые претендуют на это, но они мало что дают в практическом плане.

В рамках программы МАГАТЭ NUSS (Nuclear Safety Standards) для АС после долгих дискуссий в первой редакции была принята формулировка (в конце 70-х годов):

(1) Ядерная безопасность<sup>3</sup> – это предотвращение недопустимого риска для населения.

Эта формулировка не дает ни конкретных требований к АС как к объекту (предприятию), так и к безопасности населения как объекту в философском понимании.

В 80-х годах при пересмотре документов NUSS понятие "ядерная безопасность" было несколько трансформировано:

(2) Достижение надлежащих эксплуатационных условий, предотвращение аварий или ослабление последствий аварий, благодаря чему обеспечивается защита персонала, площадки, населения и окружающей среды от недопустимой радиационной опасности<sup>4</sup>.

Здесь требования к объекту (предприятию) расчленены на требования к нормальной эксплуатации и аварии. Относительно персонала и населения вместо риска используется термин "недопустимая радиационная опасность".

Основной национальный документ обеспечения безопасности АС [8] дает следующее определение безопасности АС, созвучное с определением (2) МАГАТЭ:

(3) Безопасность АС – свойство АС при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии, ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами.

Определение "безопасности" в двух федеральных законах близки по смыслу, но не идентичны из-за применения внутри себя различных терминов (угроза, вред, риск), что позволяет толковать их по-разному:

(4) Безопасность – состояние защищенности объекта от внешних и внутренних угроз (Закон "О промышленной безопасности").

(5) Безопасность продукции, процессов... – состояние, при котором отсутствует "недопустимый риск причинения вреда..." (Закон "О техническом регулировании").

Что следует из приведенных выше рассуждений и какие могут быть предложения о термине и определении "безопасности"? Представляется возможным декларировать следующее:

1. Во-первых, необходимо пояснять, о безопасности объекта (предприятия) или о безопасности населения (природы) идет речь.

2. Определение "безопасности объекта" без ссылок на требования безопасности населения (природы) (в любых терминах) невозможно, поскольку отсутствует точка отсчета или допустимая верхняя планка воздействия. Приведенные выше определения так и поступают.

3. Велик соблазн у многих иметь универсальное определение "безопасности", которое действовало бы для всех потенциально опасных объектов, но не видно, какая практическая польза от такого определения. Можно все же предложить следующее очевидное определение:

Безопасность объекта (предприятия) – есть безопасность населения (природы) за время функционирования объекта<sup>5</sup> при заданных внутренних нарушениях и внешних воздействиях и установленных пределах негативных воздействий на персонал, население, окружающую среду и общество.

4. Как и самое общее определение "безопасности объекта", так и следующие за ним определения "безопасности объекта в конкретной отрасли техники" могут быть реализованы только при выполнении требований, размещенных на тысячах и десятках тысяч страниц нормативных документов, как создавать и

<sup>3</sup> Под "ядерной безопасностью" в западной практике имеют в виду всю "безопасность" в отличие от нас, где этому придается более узкий смысл.

<sup>4</sup> Определение на русском языке дается в официальном переводе МАГАТЭ.

<sup>5</sup> Вывод из эксплуатации объекта еще не означает прекращения его функционирования как потенциально опасного объекта.

эксплуатировать объект, чтобы он был действительно безопасным, т.е. сами по себе эти определения мертвы. В АЭ это так [9], и к этому призывают авторы [2].

Вернемся теперь к упомянутой выше цепочке "риск – безопасность – надежность – живучесть – прочность – ресурс". Не трудно видеть, что все они переплетены и влияют друг на друга. Нельзя говорить о безопасности без прочности, надежности, риска и т.п. Подобное разделение имеет смысл для разделения задач между соответствующими специалистами и организациями, но для системного анализа безопасности и риска всего объекта – это все звенья одной цепи.

#### 4. Классификация тяжелых аварий и катастроф

В [2] приведена классификация тяжелых аварий и катастроф под разными углами зрения:

- по классам (глобальные, национальные, региональные, локальные и возможные периодически);
- по признакам (число жертв и экономические потери для каждого класса);
- по поражающим факторам (около 30 позиций различных физических воздействий, сворачиваемых затем к 9 позициям);
- по видам (техногенные, природные, природно-техногенные);
- по типам (гипотетические, запроектные, проектные, режимные);
- по характеру (радиационные, отравляющие, пожары, наводнения и т.п. – всего 10 позиций);
- по группам (отражающие степень опасности – оружие массового поражения, атомные реакторы, ракетно-космические системы и т.п. – всего 12 позиций).

Далее предполагается, что по данным анализа аварий и катастроф объектов по группам назначаются предельно допустимые воздействия (значения поражающих факторов), которые могут быть нормированы. Тем самым допускается создать единые научные основы нормирования безопасности.

Комментируя предлагаемые классификации и возможность присвоения объекту признаков по этим классификациям, отметим следующее. Невозможно большинство показателей определить и назначить детерминистски априори. Необходимо будет определить вероятность выбираемых показателей<sup>6</sup>, а также распределение плотности вероятности, т.е. их интенсивности. Возможно, что для определенных объектов можно установить верхнюю и нижнюю границы как по показателям, так и по их интенсивности. Но в целом априори представить для сооружаемого объекта информацию по всем позициям предлагаемой классификации – задача значительно более трудоемкая, чем проектирование и сооружение самого объекта. Необходимо также поиск оптимальных полных затрат на защитные системы против аварий и катастроф и затрат на компенсацию возможного ущерба [9]. На этом в [2] внимание не акцентируется.

Что касается АС, то большинство из предлагаемых признаков уже давно используется в соответствующих нормативных документах или используется на практике. Упомянутый класс аварий может быть любой, все зависит от вероятности. Поражающие факторы (радиация, взрывы, пожары и др.) не представляют особой опасности для населения и могут воздействовать только на персонал. Виды аварий везде аналогичны. Типы аварий уже давно используются в нормативной документации с соответствующими требованиями. Характер и группы говорят сами за себя.

Классификация возможных аварий для объекта важна не только априори на стадии проектирования, но и как случившийся факт с уже определившимися последствиями (ущербом). Эти данные – реальная статистика, по которой можно строить вероятностные показатели и распределения. Чем меньше вероятность события, тем меньше мы имеем объективных данных для отнесения сооружаемого объекта в обозначенное поле классификации.

#### 5. Проблемы прочности

Изложенный в [2] подход к проблеме прочности в динамике ее развития в целом соответствует тому, который использовался и используется в АЭ. И это понятно, поскольку создание основного документа по обоснованию прочности в АЭ [6] происходило под руководством и при непосредственном участии одного из авторов [2] (Н.А. Махутова).

До настоящего времени нормативные методики обоснования прочности в АЭ продолжают быть детерминированными, ресурс во многом остается назначаемым, критерии живучести не связаны с нормативными расчетами прочности и не являются продолжением критериев прочности, а повышение надежности энергетического оборудования, в свою очередь, не всегда обосновывается расчетами на прочность и во многом выполняется исключительно при помощи дублирования и проведения организационных мероприятий.

В [2] справедливо утверждается, что в настоящее время нормативные материалы по безопасности должны обязательно вписываться в сложившуюся структуру нормативных документов. Однако эту структуру необходимо постепенно изменять и не только посредством увеличения этапов при проектировании, но и установлением адекватной обратной связи.

Структурно [5] включают расчеты по выбору размеров и поверочные расчеты. Одним из определяющих поверочных расчетов является расчет на циклическую прочность.

<sup>6</sup> В этом отношении непонятно, откуда данные в последней колонке табл. 3 [2] значение "периодичности" (лет), т.е. вероятность класса аварии.

Исторически в отечественной и зарубежной нормативной документации, включающей методику расчета на циклическую прочность, кривая усталости соответствует математическому ожиданию логарифма разрушающих чисел циклов  $\lg N$  результатов статистических испытаний образцов, а за расчетную кривую усталости при этом принимается огибающая поля экспериментальных данных, состоящая из двух участков. В малоцикловой области участок расчетной кривой усталости ВА на рис. 2 получен при помощи коэффициента запаса по числу циклов  $n_N$ , а в многоцикловой области (участок кривой AC) - по амплитуде напряжения  $n_\sigma$ .

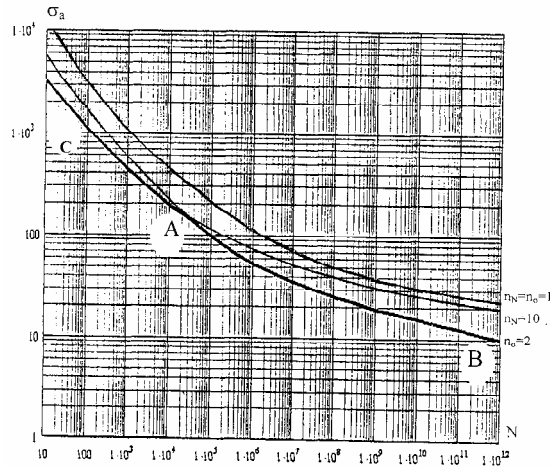


Рис. 2. Расчетные кривые усталости

При этом всегда оставалось без внимания, что огибающая, имеющая приблизительно одинаковый квантиль наступления предельного состояния "образование макротрещины" при разных  $\sigma_a = \text{Const}$ , соответствует существенно разным значениям накопленного металлом усталостного повреждения.

Физический смысл расчетной кривой усталости, полученной с помощью коэффициентов запаса по числу циклов  $n_N = 10$  и по напряжению  $n_\sigma = 2$  или при других значениях этих коэффициентов, указанных для разных случаев в отечественных и зарубежных нормативных документах [коды ASME], достаточно прост. Расчетная кривая усталости представляет собой минимальную огибающую кривую с коэффициентами запаса, имеющую приблизительно одинаковый квантиль или  $\gamma$ -процентный показатель допустимой вероятности достижения предельного состояния, но только при режимах нагрузки циклами с  $\sigma_a = \text{Const}$  по одному и тому же нормативному предельному состоянию – образованию макротрещины от 0,5 до 2,0 мм.

Необходимость перехода от детерминированного к вероятностному подходу при обосновании циклической прочности и определении ресурса следует именно из-за этого явления усталости, по которому при различных амплитудах напряжения достижение одного и того же предельного состояния с приблизительно одной и той же вероятностью происходит при различных накопленных усталостных повреждениях (от 0,1 до 0,001).

Для наглядности изложенного выше на рис.3 представлен график предельных или пороговых повреждений при различных  $\sigma_a = \text{Const}$ , который получен на основе кривых рис.2 и который однозначно обнаруживает некорректность использования гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений.

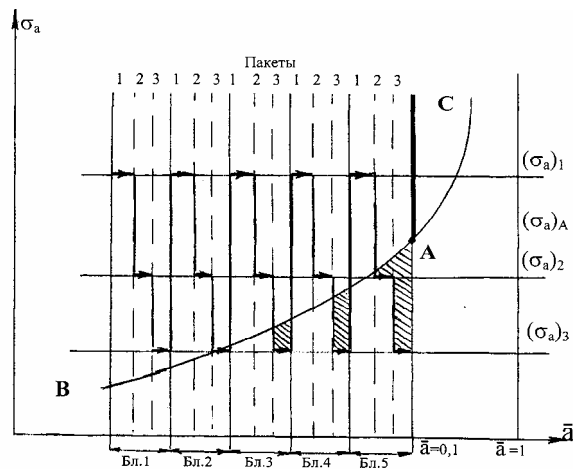


Рис. 3. Блочное нагружение (блок состоит из трех пакетов циклов)

Нанесенный на график рис. 3 пример истории нагружения одним блоком пакетов различных циклов (стрелками показана последовательность нагружения и накопления повреждений) обнаруживает временные переходы линии САВ, которые свидетельствуют о временном появлении вероятности достижения предельного состояния [6] при смене циклов от большей амплитуды к меньшей. Поскольку область правее линии САВ есть область разброса экспериментальных данных, то в этой области предельное состояние может как наступить, так и не наступить, для чего необходимо оценить вероятность достижения предельного состояния.

Разрешение возникающих вопросов возможно при использовании гипотезы вероятностного суммирования или накопления усталостных повреждений с заменой системы коэффициентов запаса на  $\gamma$ -процентный показатель достижения предельного состояния.

Для адекватной количественной оценки вероятности достижения предельного состояния при режиме нагрузки с различными амплитудами циклов необходимо применять вероятностные методы оценки прочности и особенно циклической прочности, непосредственно связанной с ресурсом, живучестью и собственно надежностью [10, 11]. Причем определяемые таким образом вероятностные методы открывают широкие возможности для устранения разрыва в оценках прочности по нормативному критерию "образование макротрещин" и критериям живучести, допускающим подрастание трещины до определенного заранее заданного размера.

При указанном подходе к обоснованию циклической прочности и ресурса появляется возможность выполнять сравнительные оценки надежности на стадии уже проектного обоснования, которые могут оказать существенное влияние и на методы анализа безопасности. На развитие вероятностного подхода для обоснования циклической прочности, ресурса, живучести и надежности отдельных элементов следует обратить больше внимания в рамках развития нормирования.

Принятие тактики на переход к вероятностным методам расчета и нормирования позволит уточнить одну из составляющих понятия "риск", связанную с вероятностью достижения ряда предельных состояний (прочности и живучести), появления аварийной ситуации на уровне критического элемента, текущего при эксплуатации свою несущую способность. Причем такой переход окажется совершенно не связанным с проблемой "хвостов" распределений из-за наличия существенных различий в допустимых или пороговых повреждениях при разных циклических нагрузках.

С переходом на вероятностную методику расчета циклической прочности появляется новый, важный для практики определяющий параметр – среднее квадратическое отклонение логарифма разрушающих чисел циклов  $S_{lgN}$ , который характеризует дисперсию разрушающих повреждений в режиме испытаний с  $\sigma_a = \text{Const}$ . В прежних расчетах на циклическую прочность параметр  $S_{lgN}$  практически не использовался. При вероятностном подходе он становится определяющим, ответственным за консерватизм оценки прочности, запаса ресурса, живучести и вообще за прочностную надежность.

В действующих нормативных документах, использующих детерминированную методику расчета на циклическую прочность, для экспериментального определения кривой усталости достаточно испытать 10-20 образцов при нескольких амплитудах напряжений и результаты обработать методом наименьших квадратов [6]. При вероятностной методике для каждой амплитуды напряжения необходимо будет получать функции распределения разрушающих чисел циклов  $F(N)$  со своими  $S_{lgN}$  и, скорее всего, в процессе эксплуатации целесообразно будет уточнять  $F(N)$  и  $S_{lgN}$ .

На этапе проектирования, когда еще не изготовлено оборудование, функции распределения  $F(N)$  могут приниматься как известные функции распределения для данной марки металла или группы металлов. В первом приближении параметры их можно получить из [6] по разности разрушающих чисел циклов, рассчитанных без коэффициентов запаса и после введения нормативных коэффициентов. В процессе изготовления оборудования и его монтажа должно быть подготовлено, а в процессе эксплуатации испытано достаточное количество образцов основного металла и металла сварных соединений с целью уточнения  $F(N)$  и  $S_{lgN}$  при реальных амплитудах напряжения и составления по ним квантильных кривых усталости.

При таком подходе в реальной ситуации в процессе проектирования будет закладываться наиболее консервативная расчетная прочность. Естественно, после изготовления прочность и ресурс могут как соответствовать проекту, так и быть больше или меньше, при эксплуатации ресурс будет вырабатываться либо быстрее, либо медленнее в зависимости от эксплуатационной истории нагружения и реальных значений  $S_{lgN}$ . Таким образом, на всех этапах жизненного пути оборудования появляется параметр, с помощью которого возможно контролировать и управлять ресурсом и тем самым повышать безопасность при эксплуатации. При уточнении  $S_{lgN}$ , относящемуся к конкретному оборудованию в процессе эксплуатации,  $S_{lgN}$ , скорее всего, будет уменьшаться (конкретный разброс всегда меньше общего), а ресурс, живучесть, надежность и безопасность будут повышаться. Увеличение  $S_{lgN}$  будет характеризовать повышение вероятности появления непредсказуемых аварийных ситуаций по причине недостаточной прочности из-за качественного основного металла или сварных соединений.

В заключение отметим, что суммарные замечания по [2] можно разделить на две части: первая – замечания по излагаемым авторами [2] общим подходам по отношению к тяжелым авариям и вторая – комментарии, в каком отношении к изложенному общему подходу находятся подходы в АЭ.

### Замечания к общему подходу [2]

1. Непонятно соотношение между декларируемыми понятиями "риск, безопасность, живучесть, надежность, ресурс, прочность". По нашему мнению, их нельзя рассматривать как независимое, отдель-



ное от общего целого. Ключевым объединяющим в этом случае словом является "безопасность". Это не значит, что каждая из составных частей не представляет собой отдельную дисциплину. Соответствующего развития требуют как весь комплекс, так и его отдельные части.

2. Не все вопросы обеспечения прочности элементов объекта отражены всесторонне. Так, не совсем ясно освещен вопрос о циклической прочности при суммировании повреждений от много- и малоциклового усталости. Не отражена четко необходимость обязательного фиксирования и архивирования имевших место нагрузок на оборудование при учете его ресурса.

3. Не акцентируется внимание на такой важной составляющей предотвращения тяжелых аварий, как фиксирование и анализ имевших место нарушений в работе объекта, пусть даже не очень существенных с точки зрения безопасности, но при отсутствующем адекватном внимании способных привести к перерастанию в область тяжелых аварий.

4. Недостаточное внимание уделяется такому важному элементу обеспечения безопасности, как интерфейс "человек-машина", обеспечению качества, культуре безопасности.

### **Замечания к подходу обеспечения безопасности в атомной энергетике в свете общих подходов [2]**

1. В целом необходимо отметить, что вопросы, поднятые в [2], находят в большинстве случаев отражение в практике создания и эксплуатации объектов АЭ. Вместе с тем, нельзя сказать, что это совпадение полное и АЭ "достигла потолка" в этих вопросах. Еще многие вопросы требуют своего рассмотрения и решения.

2. Общая концепция обеспечения безопасности АС строится на концепции многозшелонированной защиты, где на первом месте стоит вопрос предотвращения аварий любого типа за счет качества и контроля при изготовлении, а также при правильной эксплуатации.

3. Опыт эксплуатации отечественных атомных энергоблоков (сотни реакторов-лет) показал, что не все вопросы прочности и ресурса основного оборудования в первоначальном исполнении находились на уровне современного понимания.

4. Вопросы диагностики и управления тяжелыми авариями хотя и нашли отражение в определенных нормативных документах, полностью еще не исследованы и не достигнута граница полного понимания этой проблемы.

5. Обратная связь между опытом эксплуатации еще не нашла полного отражения в анализе и принятии соответствующих мер при дальнейшей эксплуатации.

### **Общее положение**

В связи с выходом Федерального закона "О техническом регулировании" возникает вопрос о целесообразности создания общего "технического регламента", охватывающего все одинаковые принципиальные вопросы обеспечения безопасности для всех техногенно-опасных отраслей, т.е. создания упомянутой в [2] Государственной системы безопасности. Материал работы [2] и опыт его использования в АЭ являются хорошим заделом для этого.

### **Литература**

1. Комплекс проектов "Безопасность. Опасные природные и техногенные процессы, оценки рисков и методы предупреждения чрезвычайных ситуаций". ФНЦП.
2. Махутов Н.А. и др. Анализ тяжелых техногенных аварий и катастроф// Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2003. Вып. 1.
3. Ковалевич О.М. К вопросу об определении степени риска//Вестник Госатомнадзора России. 2004. № 1.
4. Ковалевич О.М. Понятие риск и его производные//Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 2001. Вып. 1,
5. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1982.
6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭГ-7-008-89. М.: Госатомэнергонадзор СССР. 1990.
8. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-97. М.: Госатомнадзор России. 1997.
9. Ковалевич О.М. и др. Состояние и возможные подходы к нормированию безопасности предприятий ядерного топливного цикла//Атомная энергия. Том 78. Вып. 4. 1994.
10. Вerezemskiy В.Г. Вероятностное суммирование усталостных повреждений//Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 3.
11. Вerezemskiy В.Г. Вероятностное прогнозирование появления сквозных трещин в контурах циркуляции энергоустановок//Надежность и контроль качества. 1992. № 7.