

Республика Беларусь, наиболее пострадавшая от последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, пожалуй, как ни одна страна в мире заинтересована в стабильном и безопасном функционировании объектов атомной энергетики. К этому прилагаются серьезные усилия государства в законодательном, техническом и кадровом направлениях. Безопасная работа Белорусской АЭС – результат труда огромной команды профессионалов. В этот процесс вовлечены все: ученые, спроектировавшие реактор и осуществляющие экспертизу безопасности, медики, экологи, строители, возводившие станцию, дежурные смены на пультах управления, а также представители регулирующего органа, следящие за соблюдением строгих стандартов.



Алексей Лукашевич,
заместитель генерального директора по научной работе Объединенного института энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси, кандидат технических наук

Безопасность современных АЭС:

совершенствование технологий в ядерной сфере



Безопасность на законодательном уровне

Национальная система нормативно-правового регулирования в сфере использования атомной энергии, ядерной и радиационной безопасности имеет иерархическую структуру, которая предусматривает подчинение требований документов более низкого уровня соответствующим пунктам нормативных актов, относящихся к высшим иерархическим ступеням (рис. 1) [1].

Главенствующими в этом смысле являются такие документы, как Закон Республики Беларусь №208-З «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» от 10.10.2022 г., Закон Республики Беларусь №198-З «О радиационной безопасности» от 18.06.2019 г., Указ Президента Республики Беларусь №137 «О регулировании деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения» от 05.04.2021 г. и др. [2–4].

В частности, Законом «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» устанавливаются принципы, основными из которых являются:

- *приоритет обеспечения ядерной и радиационной безопасности и защиты жизни и здоровья населения и окружающей среды перед иными аспектами деятельности в области использования атомной энергии, в том числе экономическими;*
- *предоставление полной, достоверной и своевременной информации, связанной с регулированием безопасности при использовании атомной энергии, если эта информация не относится к той, распространение и (или) предоставление которой ограничено;*
- *обеспечение эффективного отделения регулирующих функций от других функций, связанных с содействием использованию атомной энергии;*
- *независимость органов государственного регулирования в области обеспечения безопасности при использовании*

- атомной энергии при принятии ими решений и осуществлении своих полномочий;*
- *ответственность за обеспечение безопасности;*
- *развитие атомной энергетики в мирных целях, в том числе запрет на производство ядерного оружия и других ядерных взрывных устройств;*
- *приверженность культуре безопасности на всех уровнях управления субъектами отношений в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии;*
- *обеспечение превышения выгод для населения от использования атомной энергии над вредом, который может быть причинен;*
- *участие юридических и физических лиц в общественных слушаниях на стадии принятия решений по регулированию деятельности в области обеспечения безопасности при использовании атомной энергии;*
- *защита жизни и здоровья населения и окружающей среды от негативного воздействия радиоактивных отходов в настоящее время и в будущем, невозложения чрезмерного бремени на будущие поколения;*
- *предотвращение ядерной и (или) радиационной аварий, обеспечения аварийной готовности.*

Далее рассмотрим, как эти базовые принципы реализуются на практике применительно к атомной электростанции (АЭС).

Итак, что же такое безопасность АЭС (ядерная и радиационная)? Это свойство такой станции при нормальной эксплуатации, а также при ее нарушениях, до проектных аварий включительно, ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами, ослаблять указанное воздействие при запроектных (возникших по заранее не учтенным в проекте причинам) авариях, а также уменьшать степень вероятности возникновения любой аварии – то есть обеспечивать надежную защиту людей и природы от недопустимого радиационного воздействия в соответствии с действующим законодательством [5].



Рис. 1. Национальная система нормативно-правового регулирования Республики Беларусь

Концепция глубокоэшелонированной защиты

Безопасность АЭС должна обеспечиваться за счет последовательной реализации глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, и комплекса технических и организационных мер по защите барьеров и их эффективности, а также защите людей, работающих на станции или проживающих в зоне досягаемости выбросов, и природных объектов.

Система физических барьеров современных АЭС состоит из 4 составляющих, надежно защищающих от утечек излучений и радиоактивных веществ (рис. 2) [6]:

- **топливной матрицы, предотвращающей выход продуктов деления под оболочку тепловыделяющего элемента;**
- **оболочки тепловыделяющего элемента, не дающей продуктам деления попасть в теплоноситель главного циркуляционного контура;**

- **главного циркуляционного контура, препятствующего выходу продуктов деления под защитную герметичную оболочку;**
- **системы защитных герметичных оболочек, исключающих загрязнение продуктами деления природной среды.**

Система технических и организационных мер должна образовывать 5 уровней глубокоэшелонированной защиты.

Уровень 1. Условия размещения АЭС и предотвращения нарушений нормальной эксплуатации. Относится к этапу, когда осуществляется оценка и выбор оптимальной площадки, а также установление границ защитных и аварийных зон. Проектирование реакторной установки базируется на принципах консервативного подхода и внутренней самозащитности. Эксплуатация систем ведется в строгом соответствии с регламентами. Надежность оборудования поддерживается за счет непрерывного мониторинга, профилактического обслуживания и своевременной замены выработавших ресурс элементов. Проводится формирование штата АЭС из компетентных специалистов, способных обеспечить



Рис. 2. Система физических барьеров и системы безопасности

надежное функционирование объекта и оперативно реагировать на любые отклонения от нормы, включая аварии. Ключевым элементом подготовки является создание и поддержание высокого уровня культуры безопасности.

Уровень 2. Предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации. Проводится оперативный контроль для фиксации и ликвидации технологических отклонений. Реализуются меры по управлению энергоблоком при нарушении регламентных параметров с целью недопущения перерастания сбоев в аварийную ситуацию.

Уровень 3. Предотвращение запроектных аварий системами безопасности. Активация систем безопасности для блокирования цепочки развития аварии (исходных событий – в проектные аварии, а тех – в запроектные). При невозможности купировать инцидент – приведение в действие мер по локализации радиоактивных веществ для минимизации радиационного воздействия.

Уровень 4. Управление запроектными авариями. Обеспечение возврата энергоблока в контролируемое состояние с прекращением цепной реакции, непрерывным теплосъемом и удержанием радиоактивных веществ в установленных границах. Предотвращение развития аварийных процессов обеспечивается за счет интеграции специальных технических средств, а также систем нормальной эксплуатации и безопасности, сохранивших работоспособность. Особое внимание уделяется поддержанию прочности и герметичности защитной оболочки реакторной установки.

Уровень 5. Противоаварийное планирование. Организационно-техническая подготовка и практическая реализация мер экстренного реагирования. Направлены на защиту здоровья персонала АЭС и гражданского населения в зоне возможного радиационного воздействия.

Целевые ориентиры безопасности

Целевыми ориентирами безопасности АЭС являются 3 показателя непревышения суммарной вероятности (рассчитываются за временной интервал в 1 год) [5]:

- тяжелых аварий (для каждого блока АЭС) – 10^{-5} ;
- большого аварийного выброса (также для каждого блока) – 10^{-7} ;
- тяжелых аварий с хранилищами ядерного топлива (не входящих в состав энергоблоков) – 10^{-5} .

Приведенные цифры означают, что авария на блоке атомной электростанции или хранилище ядер-

ного топлива может произойти не чаще чем 1 раз в 100 тыс. лет, а большой аварийный выброс – не чаще 1 раза в 10 млн лет. Следует обратить внимание, что вероятность последнего в 100 раз меньше, чем самой тяжелой аварии. Это значит, что даже если реактор внутри разрушится, защитные барьеры (ловушка расплава, двойной купол) обязаны в 99% случаев удержать радиацию внутри здания.

Еще один интересный момент. Если бы на Земле одновременно работало 10 тыс. ядерных реакторов, то подобная авария могла бы произойти – теоретически – один раз в 1000 лет. На практике, по информации МАГАТЭ, во всем мире всего 515 реакторов – функционирующих, приостановленных или строящихся.

Эволюция реакторов (поколение III+)

Безопасная эксплуатация новейших АЭС обеспечивается за счет внедрения современных технических решений, направленных на предотвращение аварий и минимизацию последствий любых инцидентов.

Ключевые особенности реакторов поколения III+:

- **пассивные системы безопасности.** Реакторная установка способна охлаждать себя сама без участия человека и источников внешнего питания (за счет естественной циркуляции, силы тяжести и испарения-конденсации). В проекте Белорусской АЭС заложены 2 пассивные системы отвода тепла: через парогенераторы – СПОТ ПГ и от защитной оболочки – СПОТ ЗО (рис. 3). Первая из них предотвращает плавление активной зоны при любых тяжелых авариях, таких как полное обесточивание, полная потеря питательной воды, аварий с течью теплоносителя из первого контура и других, обеспечивает уменьшение радиоактивных последствий при возникновении протечек. Вторая (СПОТ ЗО) осуществляет долговременный отвод тепла от защитной оболочки при любых аварийных ситуациях, в том числе и при полном обесточивании АЭС;
- **система удаления водорода** (рис. 4). Она представляет собой множество небольших металлических приборов – пассивных каталитических рекомбинаторов водорода, которые расставлены по разным помещениям под куполом АЭС в зонах возможного скопления газа. Внутри рекомбинатора установлены пластины со специальным катализатором (обычно это платина или палладий). Когда водород соприкасается с ним, запускается экзотермическая химическая реакция: он соединяется с кислородом воздуха, превращаясь в обычный водяной пар без какого-либо пламени, искр или детонации;

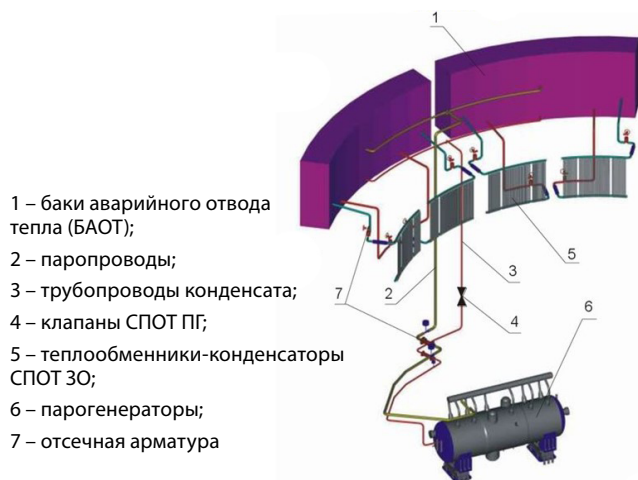


Рис. 3. Принципиальная схема СПОТ ПГ и СПОТ ЗО



Рис. 4. Рекомбинатор водорода

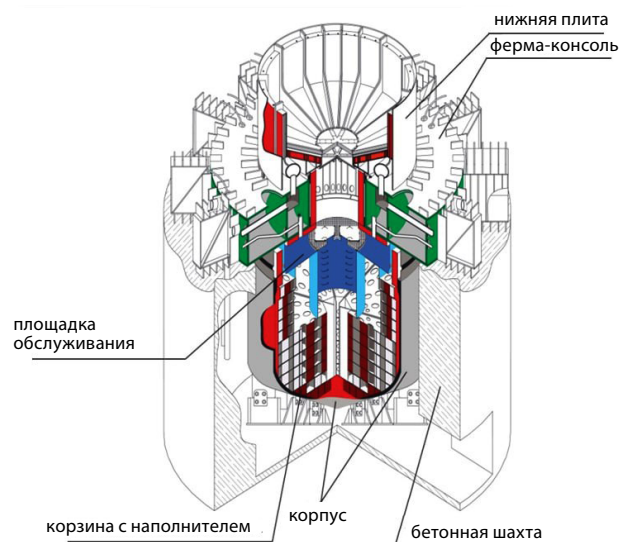


Рис. 5. Ловушка расплава

- **ловушка расплава (кориум-ловушка) (рис. 5).** Устройство локализации, представляющее собой металлическую конструкцию, наполненную особой смесью – «жертвенным материалом», которая позволяет в случае гипотетической аварии с плавлением топлива обеспечить охлаждение и отверждение расплава, а также удержание внутри себя радиоактивных газов и аэрозолей. При этом топливо и осколки элементов конструкции реактора находятся в условиях, исключающих образование цепной реакции. Впервые этим устройством была оснащена АЭС «Тяньвань» в Китае, построенная по российскому проекту, а сейчас оно предусмотрено также в проекте «АЭС-2006» [6];
 - **двойная защитная оболочка (контейнмент).** Внутренний купол удерживает радиацию, а внешний – защищает реактор от воздействий извне: землетрясений, ураганов, смерчей и даже прямого падения самолета;
 - **увеличенный срок службы.** Такие реакторы проектируются на 60 лет эксплуатации с возможностью продления еще на 20 лет;
 - **экономическая эффективность.** Повышенное выгорание топлива, сниженное количество отходов и высокий КПД энергоблока.
- Белорусская АЭС обладает всеми характеристиками поколения III+. Более того, для отечественной атомной станции указанные выше целевые ориентиры безопасности выполняются с запасом: показатель вероятности тяжелых аварий за 1 год составляет $8,57 \cdot 10^{-7}$ (1/год), среднее значение суммарной вероятности большого аварийного выброса за такой же период – $8,61 \cdot 10^{-8}$ (1/год) [7].

Международные инициативы, стресс-тесты и концепция практического исключения

В июне 2011 г. Республика Беларусь присоединилась к Совместной декларации Европейского союза и государств-соседей по проведению всеобъемлющей оценки рисков и безопасности АЭС (стресс-тестов) и приняла на себя обязательства по их осуществлению [8].

Авария на японской АЭС «Фукусима-1», произошедшая 11 марта 2011 г. из-за землетрясения и цунами, заставила операторов и регуляторов пересмотреть стандарты безопасности. Возникла необходимость детально изучить причины катастрофы, извлечь уроки и внедрить комплекс мер для предотвращения подобных (хотя и маловероятных) ЧС,

а также для защиты населения и экологии от их последствий.

Реакцией на события в Японии стали масштабные международные инициативы. Так, 25 марта 2011 г. Европейский совет инициировал пересмотр безопасности АЭС в Европе. Вслед за этим, в апреле 2011 г., участники 5-го совещания по Конвенции о ядерной безопасности приняли совместное заявление по аварии на «Фукусима-Дайити», в котором зафиксировали обязательства по переоценке надежности атомных станций и внедрению дополнительных защитных механизмов.

13 мая 2011 г. Европейская группа регуляторов ядерной безопасности (ENSREG) и Европейская комиссия согласовали технические требования для стресс-тестов для европейских АЭС (Декларация ENSREG, Приложение 1: «Спецификации стресс-теста ЕС»). В соответствии с техническими требованиями это меры целенаправленной переоценки атомных электростанций в свете произошедшего на Фукусиме-1. Они должны включать подробный анализ экстремальных природных явлений и их комбинаций, которые оказывают влияние на функции безопасности атомной станции и могут привести к тяжелой аварии.

Национальный доклад Республики Беларусь [8] содержит информацию о законодательной и регулирующей основе для обеспечения безопасности ядерных установок, характеристиках АЭС и ее защитной концепции. Стресс-тесты в рамках документа охватывают устойчивость станции к природным катаклизмам (землетрясениям, затоплениям, экстремальной погоде), а также сценарии с потерей электропитания и охлаждения. Отдельно проанализировано управление тяжелыми авариями и сформирован перечень практических шагов по повышению надежности АЭС.

Над докладом работала межведомственная группа при поддержке европейских экспертов. Результаты стресс-тестов показали, что системы безопасности Белорусской АЭС учитывают весь спектр внешних воздействий, а ее инфраструктура и оборудование спроектированы в соответствии с действующей нормативной базой.

Международные инициативы по повышению безопасности продолжились с введением Международной консультативной группой по ядерной безопасности (INSAG) и МАГАТЭ Концепции (принципа) «практического исключения».

Она состоит в том, что в проекте АЭС должно быть обосновано, что аварийные последовательности или явления, способствующие или приво-

дящие к неприемлемым радиологическим последствиям для населения или окружающей среды, физически невозможны, либо с высоким уровнем достоверности показано, что их реализация крайне маловероятна.

В 2024 г. МАГАТЭ впервые опубликовало руководство по безопасности №SSG-88 «Запроектные условия и применение концепции практического исключения при проектировании атомных станций». Результаты детерминистического и вероятностного анализа безопасности должны подтверждать практическое исключение ранних и больших аварийных выбросов в условиях запроектных и тяжелых аварий на АЭС.

Поколение IV. Будущее ядерной энергетики

Международный форум по ядерным системам IV поколения (The Generation IV International Forum – GIF), основанный в 2001 г., был создан для международного сотрудничества в этой сфере, а также обеспечения промышленного внедрения таких систем к 2030 г. В качестве технического секретариата организации выступает агентство по ядерной энергии OECD (NEA) [9].

GIF объединяет представителей различных стран для координации исследований и разработок в области этих систем. Специалисты остановили свой выбор на 6 реакторных технологиях: газоохлаждаемом быстром реакторе (GFR), свинцовоохлаждаемом быстром реакторе (LFR), реакторе на расплавленной соли (MSR), натриевоохлаждаемом быстром реакторе (SFR), реакторе с охлаждением сверхкритической водой (SCWR) и высокотемпературном реакторе (VHTR).

Для систем четвертого поколения определены 8 технологических целей в 4 широких областях: устойчивое развитие, экономика, безопасность и надежность, а также нераспространение и физическая защита. Эти амбициозные стремления разделяет большое количество государств, поскольку они направлены на удовлетворение экономических, экологических и социальных требований XXI в., создают основу и определяют конкретные задачи для сосредоточения усилий в области совершенствования реакторов.

В сфере устойчивого развития:

- *атомные энергетические системы IV поколения обеспечат устойчивую выработку энергии, отвечают целям по улучшению качества*

воздуха, а также гарантируют долгосрочную доступность систем и эффективное использование топлива для мирового производства энергии;

- позволять минимизировать и оптимизировать обращение с ядерными отходами, а также существенно снизить долгосрочную нагрузку на систему утилизации, тем самым улучшив защиту здоровья населения и окружающей среды.

В сфере экономики такие системы будут:

- обладать явным преимуществом в стоимости жизненного цикла по сравнению с другими источниками энергии;
- иметь уровень финансового риска, сопоставимый с другими энергетическими проектами.

Безопасность и надежность:

- эксплуатация ядерных энергетических систем IV поколения будет отличаться высочайшей безопасностью и надежностью;
- вероятность и степень повреждения активной зоны реактора в них будут очень низкими;
- применение таких систем устранил необходимость в выездных службах реагирования на чрезвычайные ситуации.

Нераспространение и физическая защита:

- системы атомной энергетики IV поколения не смогут быть использованы для кражи материалов, пригодных для создания оружия, а также обеспечат усиленную физическую защиту от террористических актов.

Все решения, касающиеся разработки новых реакторов, направлены на повышение их производительности, возможность применения атомной энергии в новых областях и/или более устойчивые подходы к управлению ядерными материалами. Высокотемпературные системы предоставляют возможность эффективного использования технологического тепла и, в конечном итоге, производства водорода. Повышение устойчивости достигается главным образом за счет внедрения замкнутого топливного цикла, включающего переработку и рециркуляцию плутония, урана и минорных актинов в быстрых реакторах, а также за счет высокой тепловой эффективности. Такой подход обеспечивает значительное сокращение образования отходов и потребности в урановых ресурсах.

Дополнительными характеристиками систем четвертого поколения будут:

- **цифровизация и кибербезопасность.** Переход на полностью цифровые автоматизированные

системы управления технологическим процессом (АСУ ТП). Изоляция критических сетей от Интернета для защиты от хакерских атак;

- **малые модульные реакторы.** Инновационные реакторы меньшей мощности. Их элементы производят на заводах, что повышает качество сборки и снижает риски при транспортировке и эксплуатации;
- **толерантное топливо (ATF).** Разработка новых видов ядерного топлива, устойчивого к потере теплоносителя. Оно предотвращает выделение водорода и исключает риск водородных взрывов.

Реакторы IV поколения станут ключевым элементом перехода к низкоуглеродной экономике после 2040 г. благодаря замкнутому топливному циклу и совместной генерации. В постнефтяной экономике ядерная энергетика обеспечит одновременное производство электричества и высокотемпературного тепла, необходимого для экологически чистой выработки водорода. Технологии IV поколения гарантируют максимальное использование урана за счет воспроизводства топлива, минимизируют объемы долгоживущих отходов путем рециклирования актинов и позволяют максимально соблюдать принципы нераспространения. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Описание системы нормативно-правового регулирования ядерной и радиационной безопасности – 2026 // <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/zakonodatelstvo/opisanie-sistemy-normativno-pravovogo-regulirovaniya-yadernoy-i-radiatsionnoy-bezopasnosti/>.
2. Закон Республики Беларусь №208-З «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» от 10 октября 2022 г. // <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H12200208>.
3. Закон Республики Беларусь №198-З «О радиационной безопасности» от 18.06.2019 г. // <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11900198>.
4. Указ Президента Республики Беларусь №137 «О регулировании деятельности в области использования атомной энергии и источников ионизирующего излучения» от 05.04.2021 г. // <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32100137>.
5. Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Общие положения обеспечения безопасности атомных электростанций». Утверждены постановлением Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь №15 от 13.04.2020 г. // <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22035399p>.
6. Обеспечение безопасности АЭС – 2026. // https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/obespechenie-bezopasnosti/bezopasnost-aes/.
7. Национальный доклад Республики Беларусь о выполнении Конвенции о ядерной безопасности к 10 совещанию договаривающихся сторон, Минск, 2025 // <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/5cc/kdul0t8vq01zgk4b83j7hbhysmgcbo30/Natsionalnyy-doklad-RB-2025-ru.pdf>.
8. Национальный доклад Республики Беларусь о целевой переоценке безопасности (стресс-тесты) Белорусской АЭС, Минск, 2017 // https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/88c/national-report-on-belarusian-npp-stress_tests.pdf.
9. The Generation IV International Forum – 2026 // <https://www.gen-4.org/>.