

УДК 621.039.003

Инновационные технологии, повышающие безопасность Белорусской АЭС

Дячэк О.А.

Научный руководитель – к.э.н., доцент КРАВЧЕНКО В.В.

Атомные электрические станции во всем мире – это источник повышенной опасности, поэтому применение любых инновационных технологий, повышающих безопасность таких объектов, является в высшей степени актуальным.

Для строительства Белорусской АЭС выбран инновационный проект «АЭС-2006» с реакторами ВВЭР-1200 (водо-водяной энергетический реактор, использующий обычную воду в качестве замедлителя и теплоносителя) АО «Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ». Данный проект отличается повышенными характеристиками безопасности и улучшенными технико-экономическими показателями.

Безопасность, воплощенная в ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006), является уникальной среди реакторов на рынке в развертывании полного спектра как активных, так и пассивных систем для обеспечения основных функций безопасности (рисунок 1). Таким образом, системы безопасности могут справляться со сложными ситуациями, которые выходят за рамки традиционных проектных аварий [1].



Рисунок 1 – Системы безопасности

Установка ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006) была спроектирована с учетом общероссийских требований безопасности, изданных в 1997 году и соответствующих рекомендациям Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Рекомендации агентства привели к разработке так называемых атомных электростанций поколения «3+» и действующий стандарт безопасности МАГАТЭ по безопасности проектирования атомных электростанций, изданный в 2012 году, основывается на тех же принципах. Российские общие

требования безопасности также соответствуют целям безопасности, определенным Ассоциацией западноевропейских органов регулирования ядерной безопасности (англ. WENRA – Western European Nuclear Regulators Association) в 2010 году для новых атомных станций.

Таким образом, все новые строящиеся АЭС с ВВЭР-1200 уже имеют конструктивные особенности, которые полностью учитывают основные причины аварии на Фукусиме, в том числе:

- пассивная система отвода остаточного тепла;
- двойная защитная оболочка реакторного зала (контеймент);
- ловушка расплава активной зоны, расположенная под корпусом реактора.

Системы безопасности спроектированы таким образом, чтобы станция могла стабильно работать в неблагоприятных условиях из-за природных явлений, таких как землетрясения, наводнения, штормовые ветра, ураганы, снегопады, торнадо, низкие и высокие экстремальные температуры, а также такие антропогенные события, как самолетные аварии, воздушная ударная волна, пожар, наводнение, вызванное прорывом водопровода.

Основные принципы безопасности включают в себя:

- Принцип внутренней безопасности, то есть способность реактора обеспечивать безопасность на основе естественных обратных процессов и характеристик.
- Принцип глубокошелонированной защиты, то есть использование последовательных барьеров, препятствующих выбросу ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду, а также система технических и организационных мер по защите этих барьеров [2].

Основная концепция обеспечения фундаментальных функций безопасности:

- Пассивность: пассивные средства используются для работы с «режимом расширенного проектирования» и «запроектными авариями» (пассивная система охлаждения парогенераторов, пассивная система охлаждения защитной оболочки) и обеспечивают резерв для систем активной безопасности.

- Функциональное резервирование на основе разнопринципности: для выполнения всех функций безопасности необходимо использование систем, различающихся по составу и конструктивному исполнению, физическому принципу действия.

- Физическое разделение: все четыре ряда систем безопасности и их систем управления физически разделены, что устраняет сбои в общем режиме из-за пожара, авиационного происшествия и террористического акта (рисунки 2–4). Диспетчерские пункты (главная диспетчерская и аварийная диспетчерская) также физически расположены в отдельных комнатах/зданиях [3].

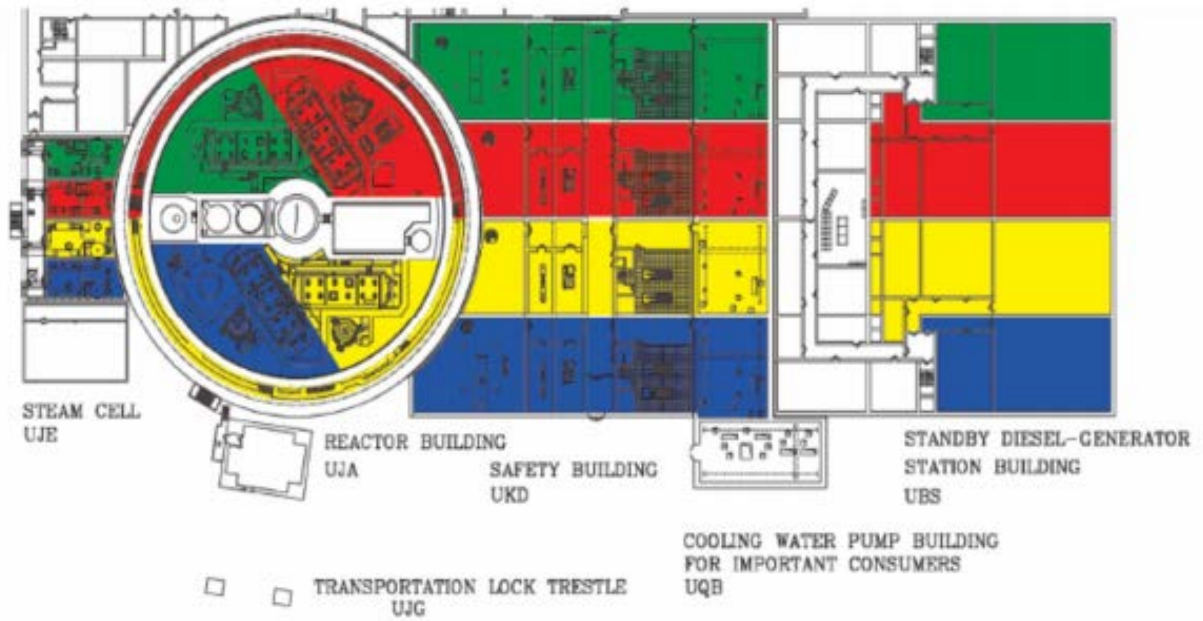


Рисунок 2 – Физическое разделение зданий с каналами систем безопасности

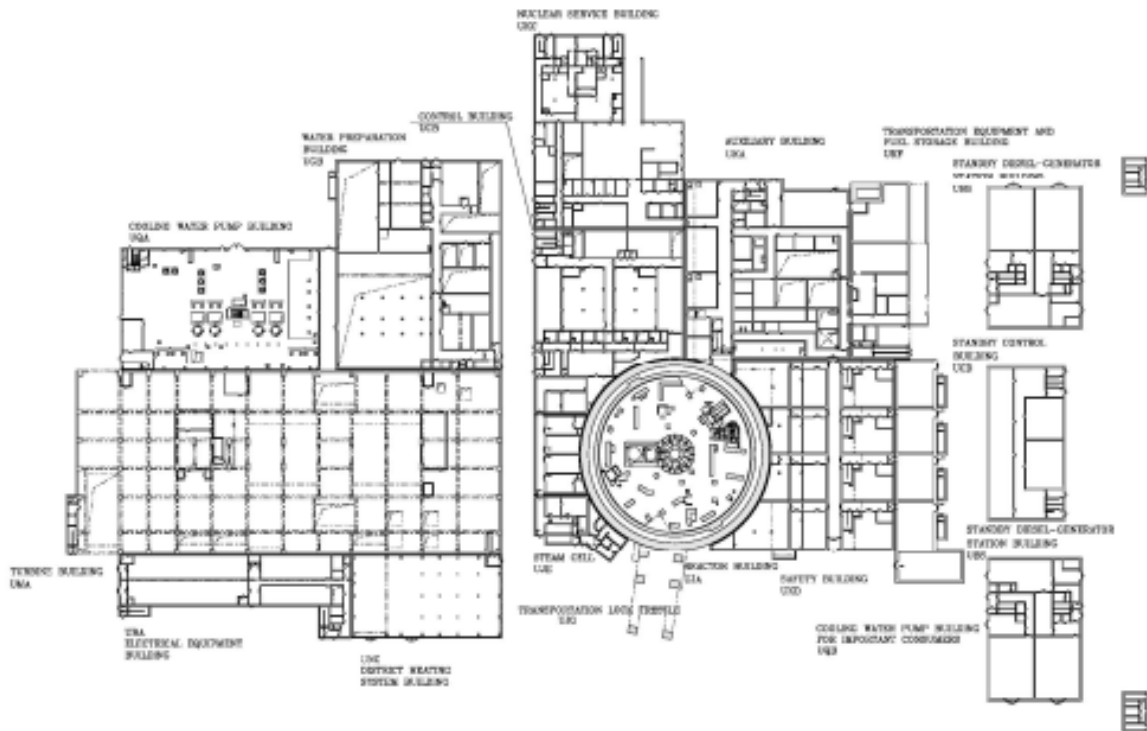


Рисунок 3 – Взаимное расположение зданий и сооружений (вид сверху)

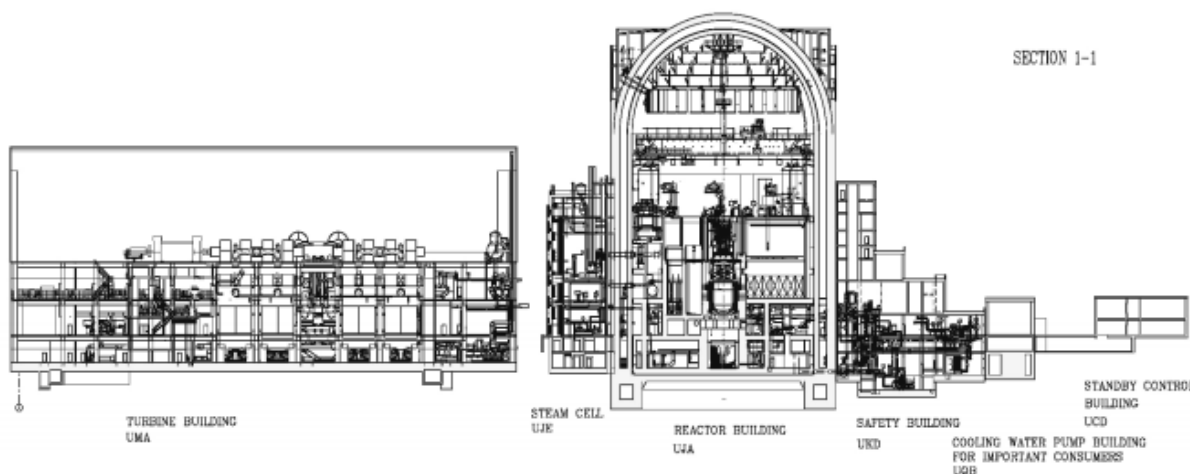


Рисунок 4 – Взаимное расположение зданий и сооружений (вид сбоку)

Надежное обеспечение трех основных функций безопасности является основным принципом при проектировании установок ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006):

1. Контроль и управление реактивностью
 - предотвращение неконтролируемого увеличения мощности реактора;
 - обеспечение быстрого безопасного останова реактора при необходимости.
2. Охлаждение активной зоны реактора
 - охлаждение остановленного реактора;
 - охлаждение отработанного ядерного топлива.
3. Локализация и надежное удержание радиоактивных материалов
 - предотвращение значительных радиоактивных выбросов в окружающую среду.

Контроль реактивности

Все реакторы ВВЭР-1200 имеют уникальную систему управления и защиты, по сравнению с другими типами ВВЭР: аварийная защита формирует команду на падение органов регулирования при возникновении аварийной ситуации. Если стержни вставлены в активную зону, реактор охлаждается до безопасного состояния и нет необходимости впрыскивать бор в теплоноситель.

Тем не менее, ВВЭР-1200 также имеет надежные системы впрыска бора. Они могут добавлять жидкость с высокой концентрацией бора в теплоноситель реактора в том случае, если стержни управления не опускаются в активную зону по какой-либо причине.

Система впрыска бора имеет четыре идентичных параллельных насоса. Работа двух насосов достаточна для быстрого отключения реактора, чтобы топливо не было повреждено в любом предполагаемом сценарии, когда быстрая вставка СУЗ выходит из строя. Если нет срочной причины, требующей быстрого отключения реактора, достаточно работы одного насоса [1].

Охлаждение активной зоны.

В ВВЭР-1200 отвод остаточного тепла может быть реализовано тремя различными способами:

- 1) активными системами к градирне или к отдельному выделенному «пруду-охладителю»;
- 2) активными системами в атмосферу;
- 3) пассивными системами в атмосферу.

Отвод тепла является важной передовой функцией обеспечения безопасности ВВЭР-1200. Система пассивного отвода тепла парогенератора (рисунок 5) предназначена для реализации следующих функций:

- отвод остаточного тепла и охлаждение реактора при полной потере мощности;
- отвод остаточного тепла и охлаждение реактора при полной потере подачи питательной воды;

- предотвращение выброса радиоактивной охлаждающей жидкости в атмосферу через перепуск пара в атмосферу или предохранительные клапаны парогенератора во время аварии, связанной с утечкой охлаждающей жидкости из первичного во вторичный контур;
- минимизация выброса радиоактивного теплоносителя во время аварии с одновременной утечкой теплоносителя из первичного во вторичный контур и разрывом паропровода между защитной стенкой и запорным клапаном трубопровода.

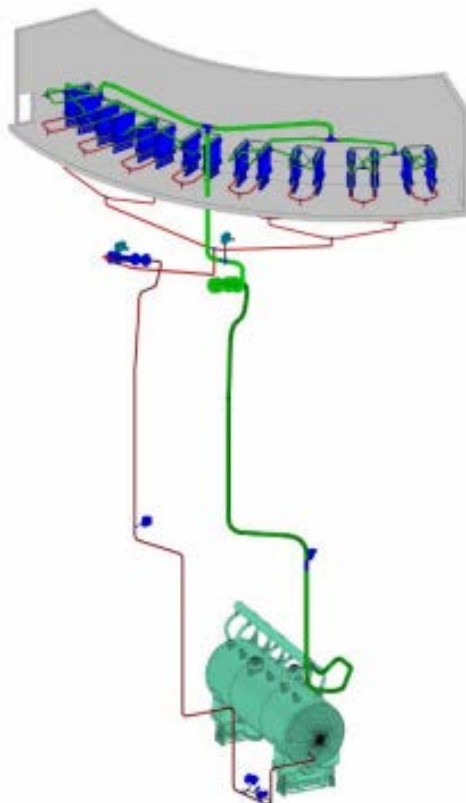


Рисунок 5 – Принципиальная схема СПОТ ПГ

Проверка производительности и эффективности СПОТ ПГ требовало много анализа, расчета, оценки и эксперимента. Аналитическое моделирование запроектных аварийных режимов проводилось с использованием сертифицированного в России теплогидравлического кода наилучшей оценки KORSAR. Экспериментальная проверка выполнения СПОТ ПГ было сделано с помощью крупномасштабного испытательного стенда на ОАО «НПО ЦКТИ» (Санкт-Петербург), который включает в себя масштабную модель СПОТ ПГ фактически используемых в ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006). Установка позволяет проводить эксперименты с использованием полномасштабных условий.

Локализация и надежное удержание радиоактивных материалов

Цель, установленная после аварии на Чернобыльской АЭС, заключалась в том, что необходимо разработать специальные системы для установок ВВЭР нового поколения для защиты защитной оболочки реактора после возможных аварий, вызванных расплавлением активной зоны. После аварии на АЭС «Фукусима» эта цель была признана обоснованной, и теперь требования включены в стандарт безопасности МАГАТЭ SSR2.1 «Безопасность атомных электростанций», выпущенный в 2012 году. Даже защита защитной оболочки реактора в случае аварии в результате расплавления активной зоны была одной из принципов проектирования, используемых для установок АЭС-2006, и экспериментальные исследования в этой области проводились в течение более 20 лет [1].

Стратегия защиты защитной оболочки ВВЭР-1200 после предполагаемого плавления активной зоны реактора заключается в том, что учитываются все явления, которые могут возникнуть в связи с расплавлением активной зоны. Эти явления заключаются в следующем:

- расплавление активной зоны реактора с высоким давлением в первичном контуре;

- избыточное давление из-за образования пара внутри защитной оболочки;
- накопление водорода внутри защитной оболочки и последующий взрыв водорода;
- паровой взрыв;
- проникновение расплавленной активной зоны реактора через нижнюю часть защитной оболочки;
- повторная критичность расплавленного ядра.

Обеспечение целостности защитной оболочки ВВЭР-1200 в этих условиях основано на системах, которые полностью независимы и отделены от систем, предназначенных для предотвращения серьезных повреждений активной зоны реактора.

Сдерживание избыточного давления осуществляется системой пассивного отвода тепла в защитной оболочке. Накопление водорода осуществляется пассивными рекомбинантами водорода, с некоторым вкладом от ловушки расплава, которая также является основной системой для устранения парового взрыва, сдерживания проникновения в нижнюю часть защитной оболочки расплавленного ядра.

Защитная оболочка (рисунок 1) предназначена для того, чтобы:

- снижать и поддерживать давление в проектных пределах внутри защитной оболочки во время запроектных аварий, в том числе сопровождающихся серьезным повреждением активной зоны;
- обеспечивать отвод тепла, выделяемого в защитную оболочку во время запроектных аварий, в том числе сопровождающихся серьезным повреждением активной зоны;

Для подтверждения эксплуатационных характеристик защитной оболочки и проверки ее конструктивных особенностей был накоплен значительный объем испытательных и аналитических работ, включая использование крупномасштабных испытательных стендов, модифицированных или изготовленных специально для этой цели.

Функции ловушки расплава:

- сохранение дна корпуса реактора в случае деформации;
- защита элементов конструкции шахты реактора от кориума;
- удержание жидких и твердых компонентов кориума, фрагментов ядра и конструкционных материалов;
- передача тепла охлаждающей воде;
- поддержание кориума в докритическом состоянии;
- минимизация выбросов радиоактивных веществ/водорода в защитную оболочку.

Ловушка расплава (рисунок 6) представляет собой металлическую конструкцию в форме конуса весом около 800 т. Она имеет двойную стенку с зазором между двумя стенками, заполненным жертвенным материалом (состоит в основном из оксидов железа и алюминия).

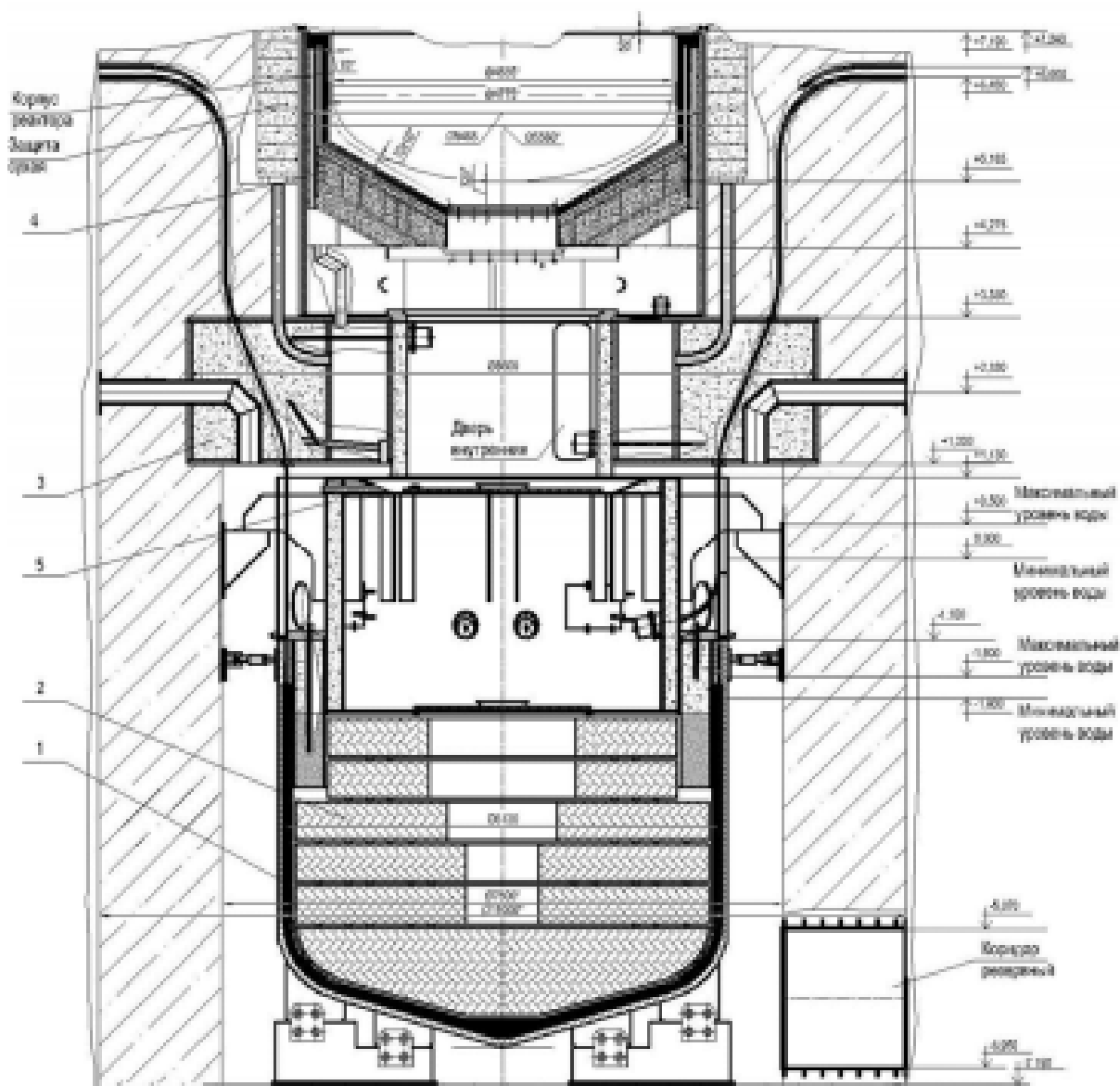


Рисунок 6 – Конструкция устройства локализации расплава

Разработка, проектирование и реализация концепции ловушки расплава была подкреплена значительной программой испытаний и анализа с участием следующих организаций: НИТИ (Сосновый Бор), Курчатовский институт (Москва), Обнинский физико-энергетический институт, Гидропресс, Санкт-Петербургский государственный технологический институт и Институт химии силикатов Российской академии наук (Санкт-Петербург) [2].

Пожарная безопасность

Для тушения пожаров ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006) оснащена пассивной системой противопожарной защиты. Она используется для того, чтобы:

- исключить одновременное воздействие огня на оборудование и элементы основного и резервного вариантов для безопасного аварийного останова и перезапуска реактора и тем самым обеспечить выполнение проектных функций этими системами во время и после пожара;
- при необходимости обеспечить локализацию и контроль радиоактивных выбросов в окружающую среду в случае пожара;
- защитить персонал и население от превышения установленных доз облучения [1].

Таким образом, применение инновационных технологий существенно улучшает характеристики энергоблоков и позволяет достигнуть целевых показателей, представленных

в технических требованиях. Большинство технологий при относительно небольших затратах значительно увеличивают безопасность, надежность, экономичность и эффективность работы АЭС.

Кроме того, внедрение инновационных разработок позволяет проводить модернизацию реакторов, включая достройку энергоблоков и установку более защищенных и энергоэффективных блоков нового поколения, что позволяет продлить срок эксплуатации АЭС, а также исключить выброс в окружающую среду радиоактивных веществ.

Литература

1. The VVER today: evolution, design, safety [Электронный ресурс]: Safety concept of VVER Gen 3+ design / Росэнергоатом. Режим доступа: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf> (дата обращения: 16.10.2019).
2. А.М. Казарин, А.В. Молчанов, Г.А. Ершов. Современная АЭС – требования и пути реализации [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-009.pdf> (дата обращения: 16.10.2019).
3. Принципы обеспечения безопасности АЭС [Электронный ресурс]: учебно-методический комплекс для студентов специальности: 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций» / Белорусский национальный технический университет, кафедра «Тепловые электрические станции» / В.А. Романко. – БНТУ, 2017. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/30304> (дата обращения: 16.10.2019).