

УДК 621.3.084.866/.039.5

ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С АВАРИЙНЫМ ОТВОДОМ ТЕПЛА ОТ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

¹Анфимов К.В., ¹Аношкин Ю.И., ¹Андреев В.В., ²Яшкин А.В., ³Грибов А.В.

¹Нижегородский государственный технический университет имени Ростислава Евгеньевича Алексеева (НГТУ им. Р.Е. Алексеева), Нижний Новгород, e-mail: nntu@nntu.ru;

²АО «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, e-mail: info@atomproekt.com;

³АО ИК «АСЭ», Нижний Новгород, e-mail: niaep@niaep.ru

Настоящая статья посвящена исследованию по оптимизации схемно-технических решений, связанных с аварийным отводом тепла от реакторной установки с водо-водяными энергетическими реакторами электрической мощности 1000 и 1200 МВт. Результатом исследования являются варианты схемно-технических решений по оптимизации системы пассивного отвода тепла от парогенератора и системы пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки энергоблока. Были проведены расчетные обоснования оптимизаций системы пассивного отвода тепла от парогенератора и системы пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки энергоблока, а именно тепловые расчеты, гидравлические расчеты, прочностные расчеты и расчеты на сейсмостойкость оптимизированных систем аварийного отвода тепла от парогенератора и из-под защитной оболочки энергоблока, реакторной установки с водо-водяными энергетическими реакторами.

Ключевые слова: реакторная установка, парогенератор, защитная оболочка, отвод тепла, системы пассивного отвода тепла

OPTIMIZATION OF CIRCUIT DESIGNS ON EMERGENCY HEAT EXTRACTION FROM REACTOR PLANT

¹Anfimov K.V., ¹Anoshkin Yu.I., ¹Andreev V.V., ²Yashkin A.V., ³Gribov A.V.

¹The Nizhny Novgorod State Technical University of Rostislav Evgenyevich Alekseev (NGTU of R.E. Alekseev), Nizhny Novgorod, e-mail: nntu@nntu.ru;

²JSC «ATOMPROYEKT», St. Petersburg, e-mail: info@atomproekt.com;

³JSC EC «ASE», Nizhny Novgorod, e-mail: niaep@niaep.ru

The present article is devoted to research on optimization of circuit designs on emergency heat extraction from reactor plant with pressurized water reactors electric capacity 1000 MBt and 1200 MBt. Result of research are variants of circuit designs on emergency on optimization of system of passive heat removal from a steam generator and system of passive heat removal from under a containment building of the power unit. Settlement substantiations optimization systems of passive heat removal from a steam generator and system of passive heat removal from under a containment building of the power unit, namely thermal calculations, hydraulic calculations, durability calculations and calculations on seismic stability of the optimized systems of emergency heat removal from a steam generator and from under a protective cover of the power unit, from reactor plant with pressurized water reactors.

Keywords: reactor plant, steam generator, containment building, heat extraction, systems of passive heat extraction

Совершенствование систем безопасности атомных станций (АС) необходимо для предотвращения запроектных аварий (ЗПА), управления запроектными авариями, ослабления последствий запроектных аварий.

Системы безопасности АС должны проектироваться: с учётом опыта эксплуатации АС, мирового опыта проектирования и аварийных ситуаций в области атомной энергетики, с выполнением требований действующих нормативно-технических документов (НТД).

Мировой опыт эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) показывает, что проблемы, связанные с безопасностью, – это проблемы потенциально возможных, маловероятных аварий по причине отказа технических систем и ошибок персонала. Очевидно, что нельзя обеспечить

абсолютную надежность оборудования, безошибочные действия операторов и инженеров на АС, поэтому при проектировании АС анализируются потенциально возможные отказы оборудования, систем, ошибки персонала, которые могут привести как к незначительному нарушению нормальной эксплуатации, так и к маловероятной аварии.

После аварии на АС Фукусима вопрос по обеспечению безопасности атомных станций стал еще более актуальным.

Важным уроком этой аварии стало то, что для обеспечения безопасности ЯЭУ нельзя пренебрегать учетом даже таких факторов риска, проявление которых считается крайне маловероятным. Таким фактором при проектировании АС Фукусима считалось полное долговременное обесточивание энергоблока. Тем не менее аварий-

ная ситуация на АС Фукусима произошла из-за ряда факторов: землетрясения, цунами, неудачного размещения на АС дизель-генераторов, неудачного размещения вспомогательного оборудования.

В последние годы произошло кардинальное реформирование концепции безопасности ЯЭУ на всех этапах жизненного цикла объекта атомной энергии. МАГАТЭ разработало обновленные документы, регламентирующие безопасность АС, с более жесточенными требованиями.

Данные требования целесообразно выполнять с помощью применения пассивных систем безопасности. В настоящее время в новых проектах энергоблоков, разработки РФ, применяются системы пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ), такие как системы пассивного отвода тепла от парогенератора (СПОТ ПГ) и системы пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки (СПОТ ЗО), конечным поглотителем тепла в которых является вода или воздух. Разработка таких систем сопряжена с необходимостью решения большого количества научных и инженерных проблем.

В проектах ВВЭР-ТОИ реализован СПОТ ПГ, но не реализован СПОТ ЗО.

В проектах АЭС-2006 реализованы СПОТ ПГ и СПОТ ЗО.

В проектах действующих АС с ВВЭР-1000 СПОТ ПГ и СПОТ ЗО не предусмотрены.

В качестве обоснования полезности внедрения в проекты с ВВЭР-1000 СПОТ ПГ и СПОТ ЗО был проведен анализ ВАБ для

проектов АС с РУ типа ВВЭР-ТОИ, АЭС-2006 и В-320.

Вероятностный анализ безопасности уровня 2 показал, что при любом значении давления под защитной оболочкой существует некоторая вероятность отказа защитной оболочки. При повышении данного давления вероятность отказа повышается.

Вероятностный анализ безопасности уровня 1 проектов ВВЭР-ТОИ, АЭС-2006, В-320 показал, что в проектах АС (ВВЭР-ТОИ, АЭС-2006), в которых реализована система отвода тепла пассивного принципа действие, значение частоты повреждения активной зоны реактора значительно меньше, чем в проектах АС с РУ типа В-320, в котором данная система не применяется.

Также наряду с вышеуказанным, основываясь на принципе выполнения вероятностного анализа безопасности, можно утверждать, что повышение надёжности работы той или иной системы напрямую зависит от количества элементов, входящих в ее состав.

Предлагаемые подходы к усовершенствованию системы пассивного отвода тепла от парогенератора

В данном исследовании предлагается разработать следующую концепцию: использовать в качестве конечного поглотителя тепла и воздух и воду, то есть использовать теплообменник комбинированного типа (схемно-техническое решение, позволяющие объединить в себе положительные стороны систем отвода тепла, реализованные в АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ).

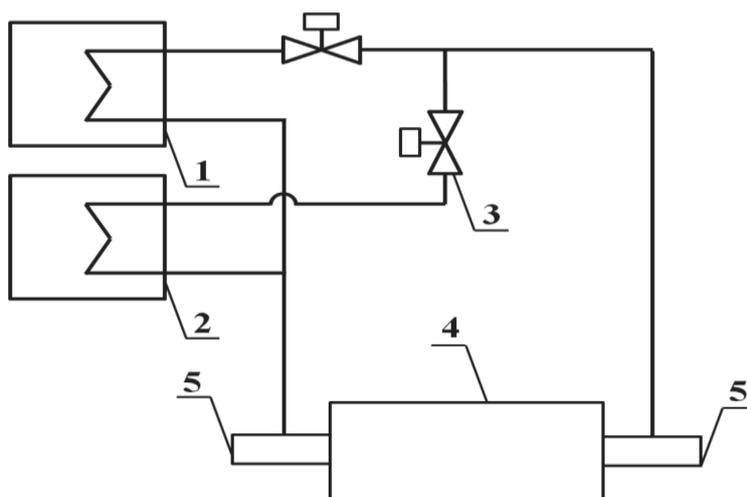


Рис. 1. Схема оптимизации системы аварийного отвода тепла от парогенератора:
1 – Воздушный теплообменник, 2 – Водяной теплообменник, 3 – Арматура,
4 – Парогенератор, 5 – 2 контур

В качестве реализации выбранной концепции может быть использована предложенная схема (рис. 1).

Полная потеря энергоснабжения РУ (отказ РДЭС, РДЭСО) приводит к отключению всех ГЦН, как следствие – прекращению отвода тепла от активной зоны, что может привести к внекорпусной стадии.

Отвод остаточных тепловыделений при полном обесточивании обеспечивается за счет отвода тепла через воздушные или во-

дяные теплообменники при естественной циркуляции (ЕЦ) по контурам СПОТ ПГ.

Реализация режима ЕЦ требует особого подхода при проектировании системы с целью создания компоновки, имеющей минимальное гидравлическое сопротивление. Одновременно с этим эффективность отвода тепла при ЕЦ со временем уменьшается при снижении температурного напора, связанного с охлаждением 1 контура и выделением растворенных газов в теплообменниках.

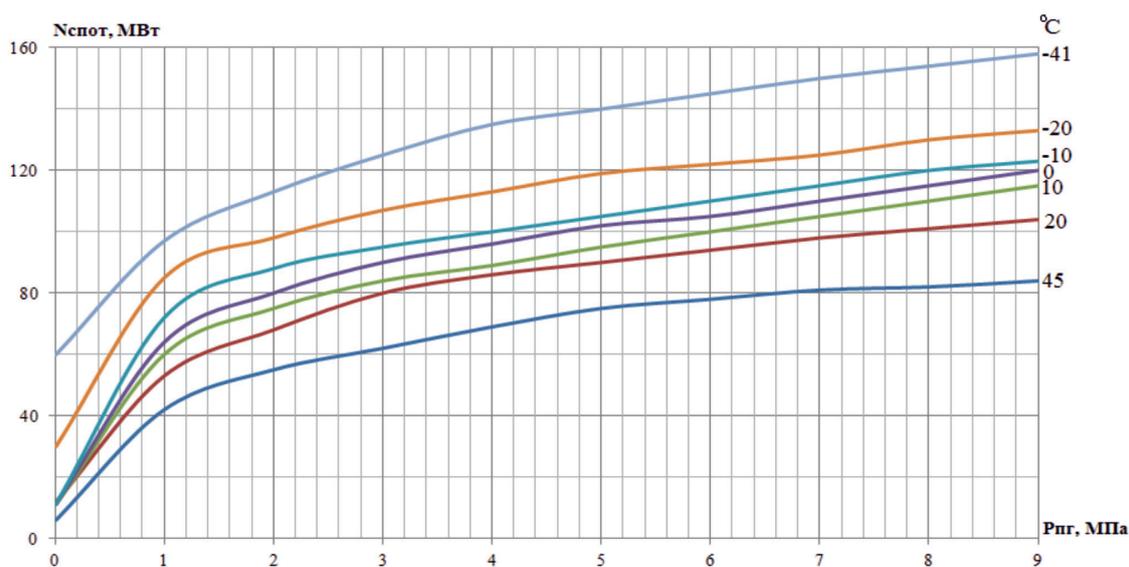


Рис. 2. Зависимость мощности ОСАОТ ПГ от давления в ПГ при различных температурах атмосферного воздуха

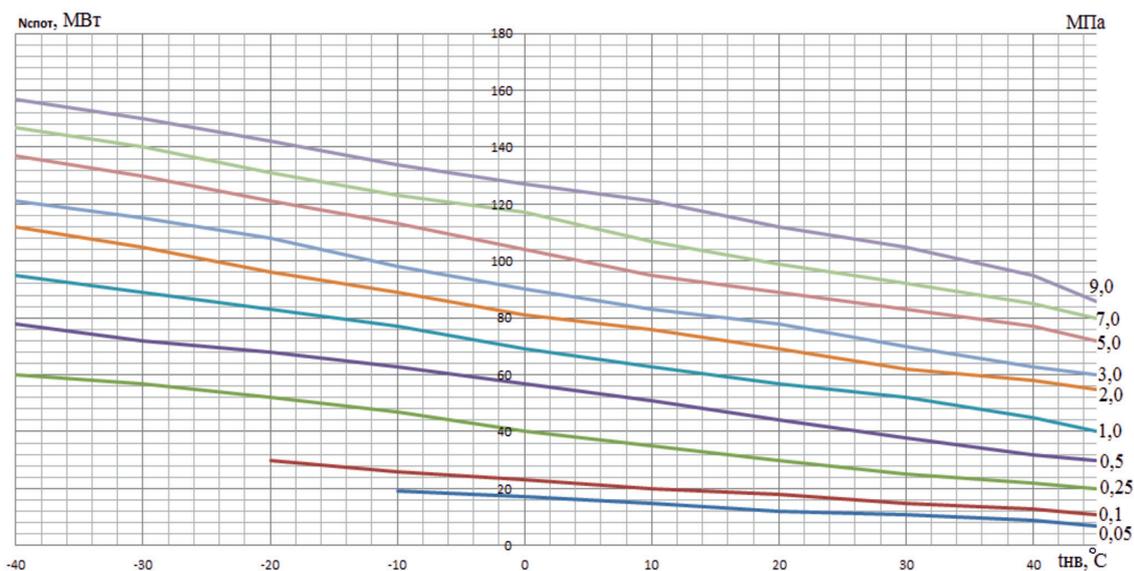


Рис. 3. Зависимость мощности ОСАОТ ПГ от температуры атмосферного воздуха при различных давлениях в ПГ

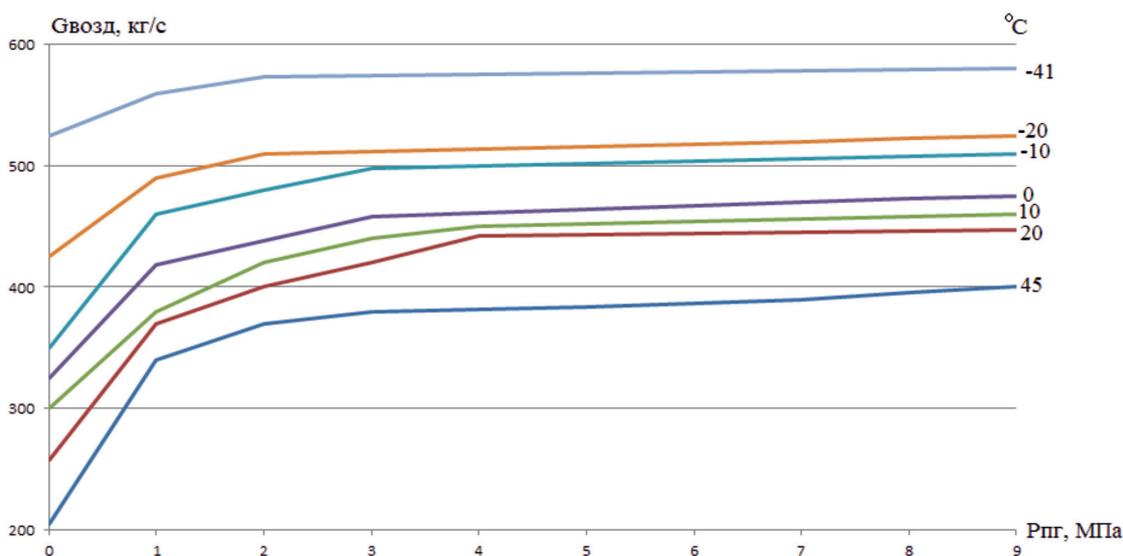


Рис. 4. Зависимость расхода в ОСАОТ ПГ от давления в парогенераторе при различных температурах атмосферного воздуха

Использование усовершенствованной системы (комбинированный теплообменник) позволит снимать пик мощности тепловыделений водой, так как теплопередающие свойства воды лучше, чем у воздуха. Это позволит снизить температуру пара до 70 °С, в то время как у воздуха мы бы получили температуру порядка 120–150 °С. Оставшиеся тепловыделения снимаются воздухом, что позволяет расхоложивать установку бесконечно долгое время. Данный комбинированный теплообменник позволяет на этой стадии работы обосновать использование системы в проектах РУ с ВВЭР. В результате получаем систему, которая функционирует всё время на протяжении протекания ЗПА.

Результаты предварительных расчётов оптимизированной системы аварийного отвода тепла от парогенератора (ОСАОТ ПГ) представлены на диаграммах (рис. 2–4).

Предлагаемые подходы к усовершенствованию системы пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки

В проектах АЭС-2006 система СПОТ 30 реализована. Отвод тепла производится через теплообменник СПОТ 30. Система пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки [1] относится к техническим средствам преодоления ЗПА и предназначена для длительного отвода тепла из-под защитной оболочки при проектных и запроектных авариях.

В проектах с ВВЭР-1000 система СПОТ 30 не предусматривается. Для отвода тепла

из-под защитной оболочки может использоваться «Система аварийного сброса газов».

Система аварийного сброса газов предназначена для сброса давления и фильтрации газов из гермообъёма, применяется при ЗПА.

В проектах с ВВЭР-1000 с неиспользованием САСГ при длительном полном обесточивании энергоблока и отказе спринклерной системы, снижение давления под защитной оболочкой производится путем открытия клапана на одной из систем вентиляции. При данном подходе производится выброс радиоактивных веществ в атмосферу, а недопущение сброса в окружающую среду является более приоритетным решением. Одним из таких решений может быть предлагаемая ниже схема. Ее реализация позволит отводить тепло из-под защитной оболочки энергоблока при длительном полном обесточивании (включая отказ дизель-генераторов) энергоблока и разрывом 1 контура без сброса в атмосферу.

На решение такой проблемы и направлено моё исследование.

Для решения проблемы данное предложена схема (рис. 5), которая позволит отводить тепло из-под защитной оболочки при тяжелой аварии с внекорпусной стадии, полным обесточиванием энергоблока и разрывом 1 и 2 контуров [2].

Вдобавок ко всему вышеперечисленному, в данный момент АО «Концерн Росэнергоатом» организуются работы по устранению имеющихся замечаний экспертов Ростехнадзора к обоснованию безопасности энергоблоков при ЗПА; обоснованию

нецелесообразности внедрения «Системы аварийного сброса газов» в проектах АС с ВВЭР-1000, по причине большой себестоимости системы.

Работа системы

Отвод тепла из-под защитной оболочки осуществляется через установленные теплообменники за счет подвода воды к теплообменникам от пожарных машин. Пожарный рукав подсоединяют к резервной гермопроходке с внешней стороны гермооболочки. С внутренней стороны к гермопроходке подключают теплообменники. Насос на пожарной машине начинает прокачивать воду через теплообменники. Через второй пожарный рукав, подсоединенный ко второй резервной гермопроходке, пар из теплообменника подается назад в бак пожарной машины. Кроме этого, у пожарной машины открыт верхний люк для эффективного теплоотвода. При необходимости подпитка бака основной пожарной машины может быть выполнена от другой пожарной машины или иного устройства.

В результате получаем длительный отвод тепла из-под защитной оболочки при полном обесточивании энергоблока без сброса радиоактивных веществ в окружающую среду. Данная схема проста в реализации и имеет невысокую себестоимость.

Для ОСАОТ ЗО были проведены предварительные расчёты.

Поверхность теплопередачи определяется из соотношения

$$F = \frac{Q}{k \times \Delta T},$$

где F – поверхность теплопередачи, м²;

Q – мощность теплообменника, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{°C}}$;

ΔT – логарифмический температурный напор, °C.

Результаты предварительного расчёта:
температура около наружной поверхности теплообменника – 147 °C;

давление – 0,251 МПа;

расчетная площадь поверхности теплообмена – 72 м²;

мощность теплоотвода – 2,35 МВт;

суммарная расчётная длина теплообменных труб – 475 м;

расход охлаждающей воды – 15,7 кг/с;

гидравлическое сопротивление теплообменника – 735,69 Па;

количество теплообменников – 10 шт;

классификация по НТД ОСАОТ ЗО:

– категория сейсмостойкости по НП-031-01 – I категория [3];

– по НП-089-15 – Группа С [4];

– по НП-001-15 – 3ЛТ [5];

Заключение

В процессе исследования были выполнены все ранее поставленные задачи, а именно:

– оценена возможность оптимизации – оптимизация возможна;

– выполнены оценочные расчётные обоснования по оптимизации;

– определено, что оптимизация целесообразна и ОСАОТ ЗО является оптимальной заменой САСГ, а ОСАОТ ПГ является улучшенной версией СПОТ ПГ.

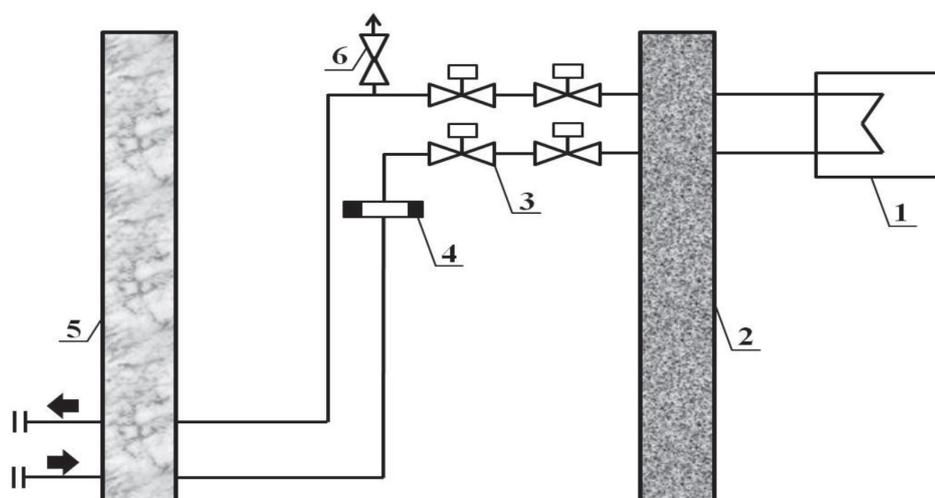


Рис. 5. Схема оптимизации отвода тепла из-под защитной оболочки: 1 – Теплообменник, 2 – Защитная оболочка, 3 – Арматура, 4 – Дроссель, 5 – Обстройка, 6 – Воздушник

Поставленные цели достигнуты и получена оптимизированная система отвода тепла от парогенератора и оптимизированная система пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки энергоблока, удовлетворяющая требованиям действующих нормативно-технических документов.

Внедрение систем отвода тепла пассивного принципа действия в проектах АС реакторной установки с ВВЭР-1000 позволяет повысить безопасность энергоблока.

На основании принципа выполнения вероятностного анализа безопасности и в связи с простотой устройства предлагаемых систем оптимизации, после ее внедрения в проект АС с РУ В-320 значение частоты повреждения активной зоны реактора уменьшится.

Список литературы

1. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций» (с изменениями на 17 января 2017 года): приказ Федеральной службы по экологическому, техно-

логическому и атомному надзору от 24 февраля 2016 года № 70 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420341403> (дата обращения: 07.09.2017).

2. Оптимизация схемно-технических решений по аварийному отводу тепла от реакторной установки// Сборник докладов 19-ой Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. – Подольск, 2017. – С. 81.

3. НП-031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 19 октября 2001 г. № 9 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200035149> (дата обращения: 07.09.2017).

4. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» (с изменениями на 17 января 2017 года): приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 года № 521 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420329010> (дата обращения: 07.09.2017).

5. Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций»: приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 года № 522 [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420329007> (дата обращения: 07.09.2017).