

DOI:10.58168/TSMST2025_186-194

УДК 621.039

АНАЛИЗ СПРИНКЛЕРНЫХ СИСТЕМ РЕАКТОРОВ ПОКОЛЕНИЯ III+

Федорова О.А., преподаватель СПО

Федоров Д.М., канд. техн. наук, доцент

**Воронежский государственный лесотехнический университет имени
Г. Ф. Морозова**

Аннотация. В данной статье проведен анализ спринклерных систем ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. Рассмотрены основные положения системы обеспечения безопасности АЭС, назначение и работа спринклерных систем водяных реакторов. Установлена схожесть систем в обеспечении снижения давления и температуры в зоне локализации аварий, уменьшении концентрации в паровоздушной среде под оболочкой радиоактивных аэрозолей и газов, предотвращении или ограничении выхода за пределы защитной оболочки радиоактивных веществ. Отмечено, что спринклерная система с РУ ВВЭР-ТОИ имеет высокую надёжности работы энергоблока в аварийных ситуациях.

Ключевые слова: система обеспечения безопасности, атомная электростанция, спринклерная система реактора, система охлаждения бассейна выдержки.

ANALYSIS OF SPRINKLER SYSTEMS OF GENERATION III+ REACTORS

Fedorova O.A., college teacher

Fedorov D.M., Ph.D., Associate Professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov**

Abstract. This article provides an analysis of the WWER-1200 and WWER-TOI sprinkler systems. The main provisions of the NPP safety system, the purpose and operation of sprinkler systems of water-cooled reactors are considered. The similarity of the systems in ensuring the reduction of pressure and temperature in the accident localization zone, reducing the concentration of radioactive aerosols and gases in the steam-air environment under the shell, preventing or limiting the release of radioactive substances beyond the protective shell is established. It is noted that the sprinkler system with the WWER-TOI reactor has high reliability of the power unit operation in emergency situations.

Keywords: safety system, nuclear power plant, reactor sprinkler system, spent fuel pool cooling system.

Атомные электростанции представляют собой сложные инженерные сооружения, состоящие из множества взаимосвязанных систем и процессов, тщательно интегрированных в комплексную технологическую структуру. В связи с растущим спросом на электроэнергию, передовым международным опытом и ужесточением правил безопасности наблюдается растущий интерес к разработке усовершенствованных конструкций энергоблоков с повышенной мощностью. Развитие ядерной энергетики в основном зависит от атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР). В современных проектах приоритет отдается внедрению передовых протоколов безопасности, основанных на многоуровневой концепции «глубокоэшелонированной защиты». Данный метод предполагает несколько уровней безопасности для минимизации потенциальных рисков и обеспечения безопасной эксплуатации реакторной установки, что отражает стремление к постоянному совершенствованию и соблюдению строгих норм безопасности [1].

Обеспечение безопасной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) зависит от целостности реакторной установки, что требует тщательного контроля оборудования на всех этапах производства и эксплуатации. Основные компоненты в контуре реактора оснащены специализированными приборами для тщательного тестирования и непрерывного обнаружения утечек, что гарантирует эксплуатационную безопасность в течение всего срока службы установки. Возможные сценарии эксплуатации включают в себя потенциальные сбои в подаче электроэнергии из-за внешних аварий, влияющих на электроснабжение АЭС. Следовательно, для обеспечения работы реактора необходимо поддерживать внутреннее энергопотребление. Для управления потенциальными сценариями отключения электроэнергии в рамках допустимых параметров безопасности внутренние потребители электроэнергии делятся на четыре отдельные группы. Ориентируясь на анализ рисков, подобный метод позволяет оптимально распределять электроснабжение в аварийных ситуациях, поддерживая стабильность работы реактора и уменьшая вероятность возникновения опасных последствий.

С точки зрения надёжности электроснабжения потребители могут быть разделены на четыре отдельные группы в зависимости от их устойчивости к перебоям в подаче электроэнергии. Первая группа не допускает перерыва в питании и включает в себя критически важные системы, такие как механизмы управления и защиты, а также аварийное освещение, для которых требуется практически мгновенное восстановление электроснабжения даже во время сбоев. Второй уровень допускает кратковременные перебои в подаче электроэнергии, измеряемые десятками секунд, и требует восстановления электроснабжения после активации системы аварийной защиты, что крайне важно для процессов охлаждения реактора. Третья группа допускает отключение электроэнергии на время автоматического ввода резерва и не требует обязательного электроснабжения после активации аварийной защиты. Наконец, четвёртая группа охватывает все остальные потребители электроэнергии, не

имеющие особых требований к электроснабжению. Такая структура обеспечивает эксплуатационную безопасность и эффективное распределение ресурсов на АЭС [2].

На атомных электростанциях потенциальная опасность возникает из-за сбоев в работе оборудования реакторной установки. Для минимизации рисков внедрена система обеспечения безопасности, включающая несколько устройств безопасности: систему аварийного останова реактора, систему охлаждения активной зоны, систему ограничения распространения радиоактивных веществ и систему контроля радиационной обстановки. Последние две системы предназначены для предотвращения расплавления активной зоны реактора и сдерживания радиоактивных выбросов в пределах защитных конструкций АЭС даже во время аварии с потерей теплоносителя. Активация систем автоматизирована и зависит от серьезности чрезвычайной ситуации, при необходимости они могут быть задействованы частично или полностью. Благодаря комплексному подходу, объединяющему эти системы защиты, значительно увеличивается безопасность АЭС и снижается вероятность серьезных инцидентов.

Система аварийного охлаждения активной зоны реактора предназначена для смягчения последствий аварии с потерей теплоносителя на атомной электростанции. Ключевой особенностью конструкции является дублирование: две независимые системы, каждая из которых способна вместить в два раза больше теплоносителя, чем требуется для смягчения последствий аварии. Эти системы физически разделены, размещены в специальных отсеках и питаются от независимых дизель-генераторов, что обеспечивает их работоспособность даже при отключении основного источника питания АЭС. Система включает в себя нагнетательные насосы высокого давления для восполнения охлаждающей жидкости, и насосы низкого давления в сочетании с теплообменниками для устранения более крупных протечек. Кроме того, для конденсации пара, образующегося при разгерметизации после разрыва трубы, предусмотрена спринклерная система, оснащенная специальными насосами. Этот процесс конденсации влияет на ограничение роста давления внутри защитной оболочки, тем самым предотвращая превышение проектных параметров и обеспечивая общую безопасность станции [3].

Спринклерная система (1JMN) ВВЭР-1200 на НВАЭС-2 совместно с системой охлаждения бассейна выдержки (1FAK10-20) предназначена для:

- снижение давления и температуры внутри защитной оболочки во время аварийных ситуаций, вызванных нарушением целостности контуров теплоносителя;
- уменьшения концентрации радиоактивных аэрозолей (в первую очередь изотопов йода) и газообразных веществ в паровоздушной среде защитной оболочки за счёт введения раствора метабората калия, способствующего химическому связыванию йода;

– предотвращения или ограничения выхода за пределы защитной оболочки радиоактивных веществ, образующихся в результате разуплотнения первого контура.

Спринклерная система выступает важнейшим элементом системы безопасности, призванным поддерживать работоспособность защитной оболочки, окружающей оборудование первого контура, при авариях, предусмотренных проектом и связанных с радиоактивными материалами и ионизирующим излучением. Главная цель этой системы заключается в регулировании давления внутри защитной оболочки в условиях максимально вероятной аварии. В частности, система спроектирована для ограничения первоначального резкого повышения давления и его последующего уменьшения до атмосферного в течение суток, тем самым обеспечивая целостность защитной конструкции. Регулирование давления играет ключевую роль в снижении последствий возможных выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду.

Система 1JMN (рис. 1) представляет собой разветвлённую сеть трубопроводов и контрольно-измерительных приборов [4]. В частности, включает в себя трубопроводы, предназначенные для подачи раствора борной кислоты к разбрызгивателям, а также трубопроводы, обеспечивающие подачу борной кислоты как из системы охлаждения бассейна с отработавшим топливом 1FAK10-20, так и из системы 1JNA. Кроме того, в состав системы входят трубопроводы сжатого воздуха, поступающего из системы 1SCD, а также дренажные линии. К основным компонентам также относятся соединительная арматура и набор контрольно-измерительных приборов, необходимых для регулирования и мониторинга системы.

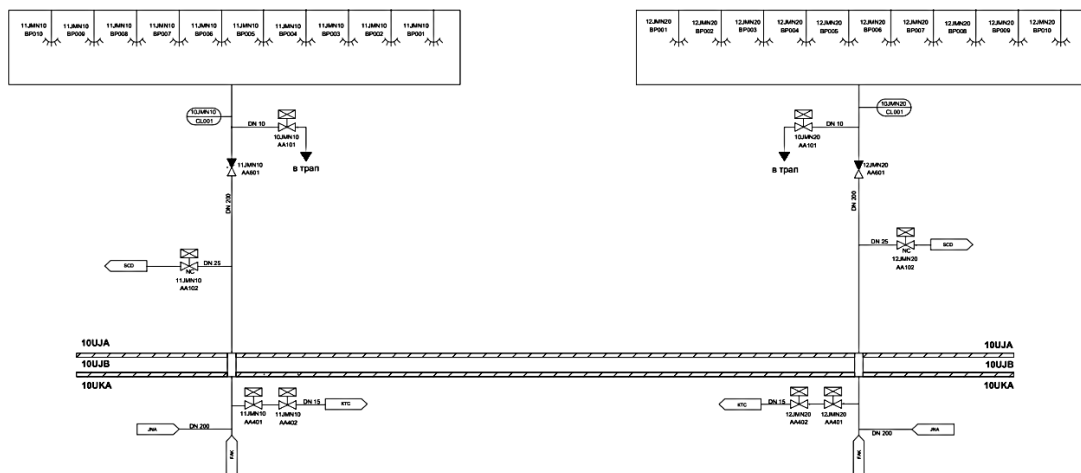


Рис. 1 Схема спринклерной системы НВАЭС-2

Спринклерная система 1JMN представляет собой пассивную сеть, состоящую исключительно из трубопроводов водоснабжения, соединённых с разбрызгивающими форсунками. В ней отсутствуют какие-либо активные компоненты, требующие внешнего питания или управления. Для контроля наличия воды в канале в раздающих спринклерных трубопроводах после

обратных клапанов 11(12)JMN10(20)AA601 установлены датчики контроля влаги 10JMN10(20)CL001. Архитектура этой системы разработана с учетом сохранения функциональности при отказе одного из активных или пассивных компонентов, либо вследствие ошибки оператора. Подобное дублирование основных элементов гарантирует стабильную работу в аварийных ситуациях. Спринклерная система остается активной в стандартных рабочих условиях и при нарушении рабочих параметров. Такое постоянное рабочее состояние обеспечивает непрерывную защиту и снижает потенциальные риски, связанные с простоем системы, повышая общую безопасность и надежность.

Спринклерная система JMN КуАЭС-2 (рис. 2), состоит из ряда взаимосвязанных компонентов, обеспечивающих комплексное функционирование [5]. Ключевыми элементами являются специальные электрические насосные установки (11JMN11AP001, 12JMN31AP001), отвечающие за активацию спринклеров. Теплообменники (11JMN10AC001, 12JMN30AC001) обеспечивают тепловое регулирование, охлаждая воду для спринклеров и бассейна выдержки. Струйные насосы (11JMN20BN001, 12JMN40BN001) облегчают подачу раствора для разбрызгивания в точку всасывания. Резервуары для хранения раствора реагента (11JMN22BB001, 12JMN42BB001) обеспечивают химическое связывание йода. Электрические насосы (10JMN81AP001, 10JMN91AP001) обеспечивают тщательное перемешивание раствора для разбрызгивания. Кроме того, система включает в себя дополнительные механизмы охлаждения бассейна с отработавшим топливом, состоящие из электрического насосного агрегата (10JMN61AP001) и теплообменника (10JMN60AC001). Наконец, трубопроводы, арматура, контрольно-измерительные приборы и защитное оборудование обеспечивают бесперебойную и безопасную работу всей системы.

Подсистема (JMN60) выполняет следующие функции:

- охлаждение бассейна выдержки при выводе в плановый ремонт одного канала активных СБ и отказе в другом канале;
- обеспечивает запас времени, необходимый для завершения планового ремонта или восстановления отказавшего оборудования;
- подача воды к спринклерным коллекторам из аварийного приямка, для снижения параметров ГО при тяжелых авариях с плавлением топлива и попаданием расплава в ловушку реактора.

Система обвязки баков запаса раствора реагентов (JMN80) выполняет перемешивание раствора реагентов, хранящихся в баках 11JMN22BB001, 12JMN42BB001. На трубопроводах, проходящих через гермообъем, установлена электроприводная локализирующая арматура.

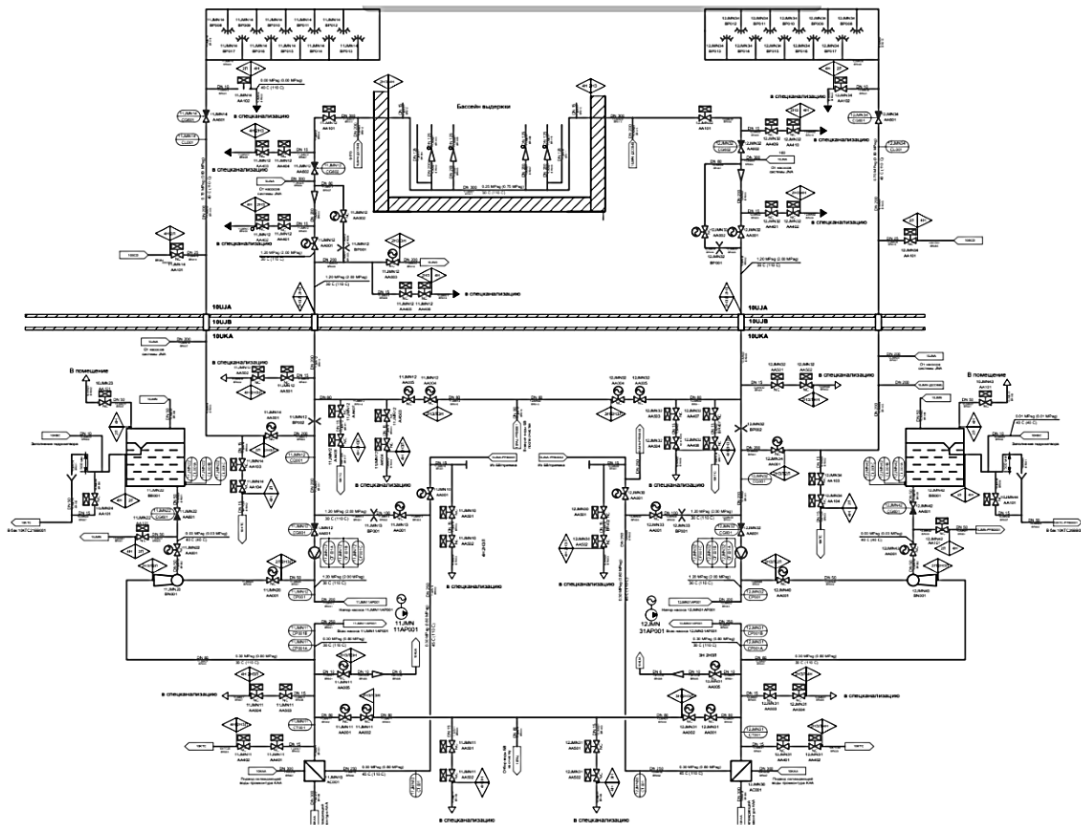


Рис. 2 Схема спринклерной системы КуАЭС-2

Спринклерная система (JMN) функционально взаимосвязана со множеством вспомогательных систем, необходимых для обеспечения эффективности работы и соблюдения протоколов безопасности. Эти соединения включают в себя систему подачи воды в бассейн с отработавшим топливом для очистки (FAL), а также механизмы аварийного и планового охлаждения как для первого контура, так и для охлаждения бассейна. Кроме того, система взаимодействует с критически важными промышленными контурами здания 10UJA (КАА), системой дистилляции (KBC10) и системой сбора борсодержащей воды (KTC10). Дополнительные соединения включают в себя систему отбора проб с оборудования в здании 10UJA (KUA10), систему гидравлических аккумуляторов (JNG10), трубопровод бассейна выдержки и шахт ВКУ (FAK50), а также трубопровод для резервного резервуара с раствором реагента для фиксации йода (JMN80).

Функционально системы схожи. Они обеспечивают снижение давления и температуры в зоне локализации аварий, уменьшение концентрации в паровоздушной среде под оболочкой радиоактивных аэрозолей и газов, предотвращение или ограничение выхода за пределы защитной оболочки радиоактивных веществ, образующихся в результате разуплотнения первого контура. Спринклерная система с РУ ВВЭР-ТОИ помимо вышеперечисленных функций ещё обеспечивает отвод остаточного тепла от топлива.

Спринклерная система ВВЭР-1200 по назначению является системой безопасности, по характеру выполняемых функций локализующей системой безопасности, а спринклерная система на ВВЭР-ТОИ является системой нормальной эксплуатации, совмещающая функции безопасности. Спринклерная система ВВЭР-ТОИ состоит из дополнительной системы охлаждения бассейна выдержки, системы обвязки баков запаса раствора реагентов для химического закрепления йода, которых нет в составе спринклерной системы на ВВЭР-1200. В своём составе спринклерная система ВВЭР-1200 активного оборудования не имеет. В неё входят трубопроводы, арматура и спринклерные форсунки. Спринклерная система ВВЭР-ТОИ в своём составе имеет, как активные элементы, так и пассивные.

Во время стандартных рабочих процедур спринклерная система ВВЭР-ТОИ играет важную роль в отводе тепла от бассейна с отработавшим топливом как во время работы установки, так и во время простоя. Эта система обеспечивает термическую стабильность топлива. Учитывая избыточность одновременной работы в этом режиме, один канал остается в резерве, что оптимизирует распределение ресурсов. Непрерывная циркуляция охлаждающей жидкости через теплообменники поддерживается в обоих каналах, эффективно регулируя температуру воды в спринклерной системе и температуру бассейна с отработавшим топливом. Данное технологическое решение предотвращает перегрев и обеспечивает безопасность эксплуатации. Важно отметить, что спринклерная система ВВЭР-1200 спроектирована уникальным образом: она находится в пассивном состоянии во время стандартной эксплуатации, но мгновенно активируется при возникновении нештатной ситуации. Такой многоуровневый подход к охлаждению и безопасности подчеркивает надежность конструкции этих ядерных установок.

При отклонениях в работе система функционирует в обычном режиме. При потере электропитания происходит последовательный запуск дизель-генераторов с одновременным включением всех насосов системы. Кроме того, в случае аварии, при которой давление в защитной оболочке превышает 30 кПа, автоматически включаются спринклерные насосы, что обеспечивает поддержание безопасности в нештатных и аварийных ситуациях. В запроектных авариях на РУ ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ с отказом обоих каналов системы 10JMN выполнение функции снижения давления под оболочкой обеспечивается насосом низкого давления системы аварийного и планового расхолаживания и охлаждения бассейна выдержки 10JNA. В реакторной установке ВВЭР-1200 отвод тепла осуществляется через брызгальные бассейны. Данный процесс разворачивается в несколько этапов: сперва системы 1FAK10-20 или 1JNA выполняют роль промежуточного контура охлаждения элементов энергоблока 10UJA (1КАА), далее система, обеспечивающая охлаждение основного оборудования (1РЕВ), передает тепло брызгальный бассейн, откуда оно рассеивается в атмосферу.

В случае возникновения нештатных ситуаций на реакторной установке ВВЭР-ТОИ, в частности связанных с длительной потерей всех источников переменного тока или отказом систем отвода тепла более чем на 72 часа, применяется стратегия уменьшения последствий. Основной канал системы обеспечивает отвод тепла из бассейна выдержки путем подключения мобильного оборудования к альтернативному каналу отвода тепла промышленного контура станции. Тепло от топлива в бассейне передаётся последовательно через теплообменники (11JMN10AC001), теплообменник промышленного контура (11KAA10AC001) и в конечном итоге рассеивается через сухую вентиляторную градирню. Данная схема обеспечивает непрерывное охлаждение отработавшего топлива, предотвращая потенциальное развитие аварии.

При наложении течи первого контура первый канал системы обеспечивает подачу воды аварийного приямка к бассейну выдержки с расходом, исключающим кипение воды в бассейне выдержки и, как следствие, роста давления под оболочкой (не менее $50 \text{ м}^3/\text{ч}$). Одновременно вода подается в реактор через трубопроводы системы гидроемкостей второй и третьей ступени 10JNG10 с расходом не менее $270 \text{ м}^3/\text{ч}$, что обеспечивает отвод тепла от активной зоны и исключает поступление пара в ГО. Существует также возможность переключения канала на линию подачи борного раствора к спринклерным коллекторам для снижения давления под оболочкой.

В случаях тяжелых аварий с плавлением топлива и попаданием расплава в ловушку реактора дополнительная система охлаждения бассейна выдержки может быть подключена для подачи воды к спринклерным коллекторам из аварийного приямка для снижения параметров в ГО. Для упрощения процедур аварийного охлаждения в системе предусмотрены специальные трубопроводы для подачи воды. В частности, трубопровод, оснащённый арматурой 10JMN64AA101, проходит от аварийного приямка до теплообменника вспомогательной системы охлаждения для бассейна охлаждения. Вторым трубопроводом, оснащённым 10JMN65AA101, соединяется с коллектором спринклеров основного канала. Трубопровод 10JMN65AA101 к спринклерному коллектору разделен на секции, расположенные дальше от 11JMN14AA001, которые находятся за пределами защитной конструкции. Во время длительного простоя сценарии, связанные с отключением станции, включающие полную потерю переменного тока или нарушение отвода тепла к основному поглотителю, требуют задействования системы ДСОБВ. Активация происходит через 72 часа после начала аварии для управления тепловыделением отработавшего ядерного топлива в бассейне выдержки и активной зоне реактора (объёмы бассейна выдержки и перегрузки топлива объединены). Данная концепция обеспечивает непрерывное управление температурой в условиях тяжёлой аварии.

Приоритетной задачей работы АЭС является её безопасность, надёжность и экономичность. Спринклерная система выполняет важную функцию в аварийных режимах, а именно предотвращает выход радиоактивных веществ за пределы гермообъёма. Достоинством ВВЭР-ТОИ является повышение

надёжности работы энергоблока в аварийных ситуациях. Применение спринклерной системы на ВВЭР-ТОИ обеспечивает более высокий уровень безопасности, по сравнению с ВВЭР-1200, благодаря наличию дополнительной системы охлаждения бассейна выдержки.

На ВВЭР-ТОИ в состав спринклерной системы входит система охлаждения бассейна выдержки (ФАК10-20), которая на ВВЭР-1200 является отдельной системой, поэтому для повышения безопасности ВВЭР-1200 рекомендуется модернизировать спринклерную систему путем объединения спринклерной системы и системы охлаждения БВ и внедрения в неё ДСОБВ. Повышение концентрации бора в растворе борной кислоты позволит улучшить эффективность ввода отрицательной реактивности в аварийных ситуациях, что в свою очередь повысит уровень безопасности и надежности работы АЭС. Таким образом, реализация предложенных мероприятий позволит обеспечить более эффективную и безопасную эксплуатацию атомных электростанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зорин, В. М. Атомные электростанции: учебное пособие / В. М. Зорин. – М: Издательский дом МЭИ, 2012. – 642 с.
2. Сидоренко, В. А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР / В. А. Сидоренко. – М.: Атомиздат, 1977. – 216 с.
3. Иванов, В. А. Эксплуатация АЭС: учебник для вузов / В. А. Иванов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 380 с.
4. Эксплуатационные схемы спринклерной системы энергоблока № 1 Нововоронежской АЭС-2.
5. Эксплуатационные схемы спринклерной системы энергоблока № 1 Курской АЭС-2.

REFERENCES

1. Zorin, V. M. Nuclear Power Plants: a textbook / V. M. Zorin. – M: MPEI Publishing House, 2012. – 642 p.
2. Sidorenko, V. A. Issues of safe operation of WWER reactors / V. A. Sidorenko. – M.: Atomizdat, 1977. – 216 p.
3. Ivanov, V. A. Operation of NPPs: a textbook for universities / V. A. Ivanov. – St. Petersburg: Energoatomizdat, 1994. – 380 p.
4. Operating diagrams of the sprinkler system of power unit № 1 of Novovoronezh NPP-2.
5. Operating diagrams of the sprinkler system of power unit № 1 of Kursk NPP-2.