

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

Атомная
техника
за рубежом

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ПЕРЕВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ИЗДАЕТСЯ С МАЯ 1957

№ 5, май 1988

ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНЫХ ЗОН ЛЕГКОВОДНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

После аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» и Чернобыльской сформировался новый подход к безопасности АЭС с легководными ядерными реакторами. Это концепции реакторов PIUS-PWR [1], PIUS-BWR [2] и ISER [3] с внутренне присущими им свойствами безопасности. Она достигается высоким уровнем их самозащищенности против аварий, ошибочных действий персонала и диверсий. Одна из особенностей этих концепций — использование полностью пассивных систем аварийного охлаждения активной зоны, основанных только на физических законах, в частности на законах гравитации и гидравлики. Несмотря на привлекательность АЭС с внутренне присущей безопасностью, в настоящее время они обладают рядом относительных недостатков: сложность сооружения, повышенная стоимость, длительный цикл строительства, трудность лицензирования. Поэтому оправдан интерес к промежуточным проектам, сочетающим и имеющийся опыт, и новые концепции.

Пассивный конденсатор

Фирма «Дженерал электрик» (США) совместно с фирмой «Джапан атомик пауэр» (Япония) и

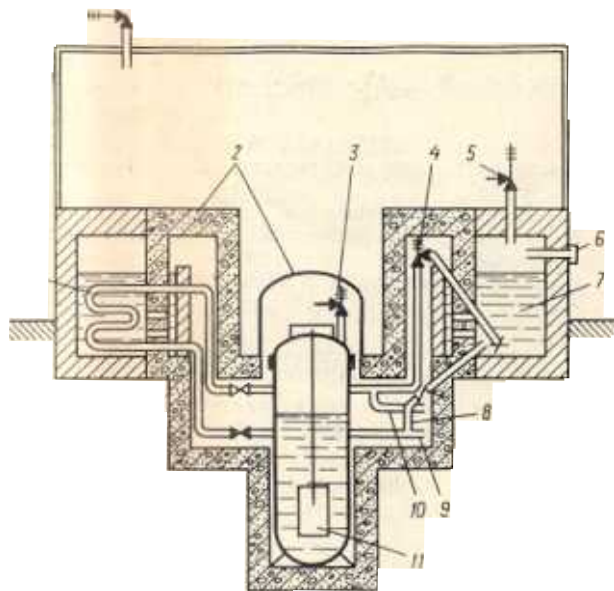


Рис. 1. Схема аварийного охлаждения реактора BWR фирмы «Дженерал электрик»: 1 — пассивный конденсатор; 2 — защитная оболочка; 3 — предохранительные клапаны; 4 — клапаны сброса давления; 5 — предохранительный клапан защитной оболочки; 6 — долговременная подпитка водой низкого давления; 7 — бассейн-барботер; 8 — линия впрыска воды охлаждения активной зоны; 9 — линия питательной воды; 10 — паропроводы первого контура; 11 — активная зона

институтом EPRI (США) разрабатывают проект ядерного реактора BWR электрической мощностью 600 МВт [4, 5], в котором усовершенствованы некоторые системы безопасности (рис. 1). Во время переходных процессов тепло от активной зоны отводится через изолированный пассивный конденсатор, вынесенный за пределы реактора и находящийся под слоем воды. Для его подключения необходимо открытие клапана. В случае отказа пассивного конденсатора или аварии с потерей теплоносителя для охлаждения активной зоны используют воду бассейна-барботера, расположенного выше корпуса реактора. При нормальной эксплуатации в бассейне-барботере поддерживают давление ниже, чем в реакторе, от которого он отделен обратным клапаном. В случае аварии предохранительный клапан выравнивает давление путем сброса воды из реактора в бассейн-барботер, где она и локализуется. Далее происходит затопление активной зоны под действием силы тяжести. Таким образом, для аварийного охлаждения реактора не требуются насосы и дизель-генераторы.

Пассивное охлаждение

В разрабатываемом фирмой «Вестингауз» усовершенствованном PWR (AP-600) электрической мощностью 600 МВт [6] похожая схема аварийного охлаждения состоит из пассивных элементов и клапанов, получающих электропитание от батарей. В случае отказа систем нормальной эксплуатации два пассивных теплообменника позволяют отводить остаточное тепло при любом давлении в реакторе. Для длительной пассивной подпитки первого контура водой при любом давлении предусмотрены также две емкости. При аварии с потерей теплоносителя осуществляется быстрый залив активной зоны из двух баков. Длительное пассивное охлаждение активной зоны проводится конденсацией истекающего из первого контура пара на стенах защитной оболочки, стеканием конденсата в специальный бак и возвратом его в первый контур. От стен защитной оболочки тепло отводится в атмосферу естественной конвекцией.

Система FIVES

В проекте реактора BWR (с полностью пассивной системой аварийного охлаждения), названного PECOS-BWR [7], использовано то же оборудование, что и на существующих АЭС (в качестве прототипа выбрана АЭС «Дрезден-1»). Для АЭС электрической мощностью 750 МВт проектируется система аварийного охлаждения, состоящая из трех взаимосвязанных подсистем: системы одно-

дневного запаса холодной борированной воды (FIVES) внутри корпуса реактора, воздушной системы теплоотвода при помощи естественной конвекции, системы дренирования бассейна перегрузки (вспомогательная система).

Система FIVES предназначена для остановки реактора и охлаждения его активной зоны в течение первых суток. Для ее включения при низком уровне теплоносителя в корпусе реактора не требуется ни оборудования с движущимися частями (клапанов, электродвигателей насосов, дизель-генераторов), ни быстродействующей переключающей аппаратуры. Все элементы системы FIVES, требуемые для функционирования при аварии, размещены в корпусе реактора и не могут быть выведены из работы действиями оператора. Однодневный запас воды в системе (приблизительно 1,0 м³ на 1 МВт электрической мощности) выбран из расчета обеспечения достаточного времени для мобилизации всего ремонтного персонала АЭС, снижения радиоактивности наиболее опасных короткоживущих радионуклидов и остаточного тепловыделения реактора до уровня менее 1 % номинальной мощности, при котором становится эффективной воздушная система пассивного теплоотвода. По сравнению с реактором PIUS объем запасенной в корпусе реактора воды снижен в 7 раз. Это позволяет отказаться от бетонного корпуса в пользу металлического высотой 36 м.

В систему FIVES (рис. 2) входит запас холодной борированной воды под давлением, равным давлению в первом контуре; узел гидравлического вихревого клапана, который отделяет аварийный запас воды системы FIVES от горячего теплоносителя в нижней части реактора; система водяных насосов, которая обеспечивает энергией гидравлические клапаны и служит датчиком уровня воды в реакторе.

Запас холодной борированной воды FIVES отделен от горячего теплоносителя стенкой и имеет зоны контакта в верхней и нижней частях реактора, стабильность которых при нормальной эксплуатации обеспечивают паровые затворы, а в нижней части, где из-за разности плотностей давление холодной воды системы FIVES немного выше, чем давление горячего теплоносителя, еще и гидравлический вихревой клапан. Если гидравлический клапан открыт, это приводит к заполнению активной зоны холодной борированной водой. Клапан не имеет движущихся частей и закрыт, если получает постоянный напор воды от системы водяных насосов. По существу это модифицированный гидравлический усилитель, работающий как клапан (рис. 3) и подобный аналогичному клапану PIUS-BWR [2]. Поступающая в клапан вода движется по кругу. Центробежные силы создают пониженное давление около внутренней и повышенное около внешней стенки клапана, которая имеет отверстия, соединяющие ее с зо-

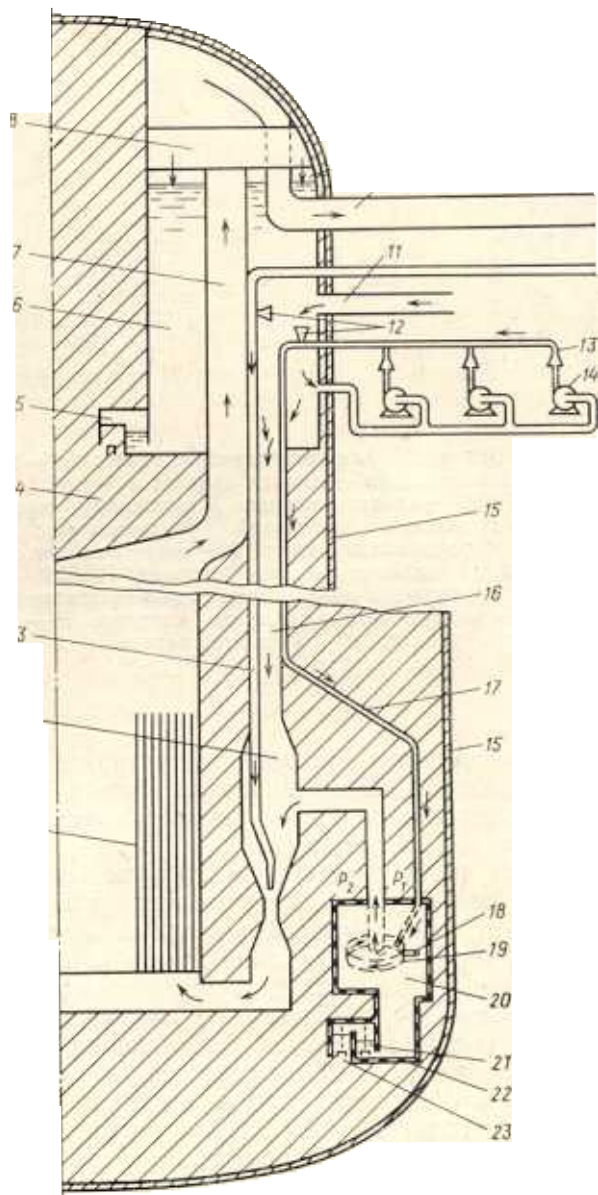


Рис. 2. Реактор PECOS-BWR с системой FIVES: 1 — активная зона; 2 — горячий теплоноситель; 3 — напорная линия главного циркуляционного насоса; 4 — холодная борированная вода; 5 — верхний паровой затвор; 6 — теплоноситель; 7 — подъемный участок; 8 — сепаратор пара; 9 — уровень воды; 10 — направление пара к осушителю и затем на турбину; 11 — подвод питательной воды и конденсата от осушителя; 12 — антисифонные прерыватели; 13 — обратные клапаны; 14 — водяные насосы системы FIVES; 15 — корпус реактора; 16 — опускающий участок; 17 — напорный трубопровод водяных насосов системы FIVES; 18 — отверстия на внешней поверхности гидравлического клапана; 19 — узел гидравлического клапана; 20 — теплоноситель под давлением холодной борированной воды; 21 — датчики уровня; 22 — паровой затвор; 23 — электронагреватель

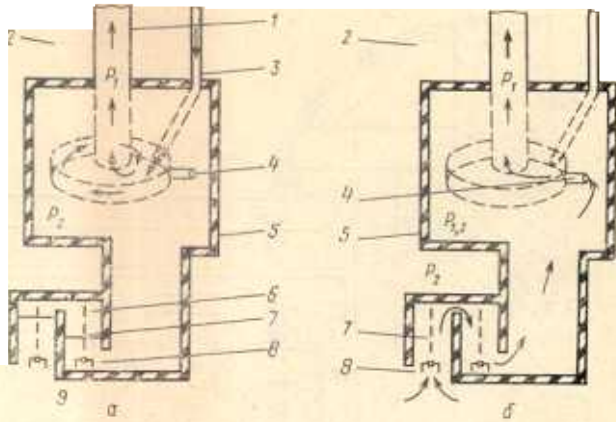


Рис. 3. Вихревой гидравлический клапан: а — нормальная эксплуатация — клапан закрыт; б — работа системы FIVES — клапан открыт. К опускному участку: 1 — горячий чистый реакторный теплоноситель; 2 — холодная борированная вода; 3 — вода под высоким давлением от водяных насосов системы FIVES; 4 — отверстие на внешней поверхности гидравлического клапана; 5 — корпус гидравлического клапана; 6 — пар; 7 — датчики уровня; 8 — электронагреватель; 9 — давление, равное P_2 ($P_2 > P_{1,2} > P_1$)

ной теплоносителя. Эта зона контактирует с водой системы FIVES через паровой затвор, в котором электронагревателем поддерживают необходимое количество пара.

Защита против падения уровня воды в реакторе ниже допустимого обеспечивается установкой водяных насосов значительно выше активной зоны. При «потере» питательной воды насосы осушаются раньше, чем активная зона, что приводит к своевременному срабатыванию системы FIVES в течение нескольких секунд. Объем воды в опускном участке реактора между отметкой высоты уровня воды в сепараторе пара и отметкой высоты входа в водяные насосы выбирают таким, чтобы переходные процессы не приводили к срабатыванию системы FIVES. Это будет происходить только тогда, когда возникнет серьезная угроза герметичности активной зоны — событие, расчетная частота которого менее 1 раза за срок службы АЭС.

Для экономичной работы АЭС необходимо исключить возможность ложных срабатываний системы FIVES. Для обеспечения высокой надежности предусмотрено резервирование системы FIVES по измерительным приборам, водяным насосам и электронагревателям пара для парового затвора. Например, устанавливают параллельно три насоса, каждый из которых способен обеспечить достаточный расход для того, чтобы гидравлический клапан оставался закрытым. Поэтому при нормальной работе каждый насос загружен только на одну треть.

Система теплоотвода, использующая естественную конвекцию воздуха, спроектирована так,

чтобы обеспечить температуру воды системы FIVES около 60°C при нормальной эксплуатации и длительное пассивное охлаждение активной зоны в аварийной ситуации, начиная с 12—24 ч после начала работы системы FIVES. Воздушная система теплоотвода представляет собой двухфазную аммиачную теплопередающую петлю на естественной циркуляции, в которой аммиак испаряется внутри охладителей воды системы FIVES, транспортируется к воздухоохладителям и конденсируется в них. В качестве воздухоохладителя использована невысокая градирня на естественной тяге, поддерживаемой, если требуется, охлаждающими вентиляторами. Системы пассивного водяного (FIVES) и воздушного охлаждения взаимно дополняют одна другую, так как первая обладает высокой мощностью теплоотвода, но является сравнительно короткодействующей, а вторая — наоборот.

Дополнительное повышение безопасности достигнуто размещением активной зоны, так же как и бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива, на нижних высотных отметках. Это обеспечило большую устойчивость при землетрясениях и появление дополнительных возможностей аварийного охлаждения, функции которого может выполнять система дренирования бассейна перегрузки. Этот бассейн, расположенный выше активной зоны, не предназначен для хранения ядерного топлива, поэтому его воду можно использовать. Система дренирования оснащена клапанами и подобна рассмотренной выше системе аварийного охлаждения BWR фирмы «Дженерал электрик» [4, 5].

Охлаждение при обесточивании

Система аварийного охлаждения активной зоны на итальянской АЭС MARS (реактор PWR) рассчитана на работу только при авариях, вызванных обесточиванием АЭС или «потерей» питательной воды в парогенераторах [8]. Это объясняется тем, что конструкцией АЭС исключена возможность утечки теплоносителя первого контура, который находится в защитной оболочке, заполненной водой с низкой энтальпией при давлении, равном давлению первого контура. Система охлаждения срабатывает автоматически и полностью пассивна. Она трехконтурная (рис. 4), состоит из двух каналов, через каждый из которых может проходить до 100 % воды, отводящей остаточную теплоту реактора. Основной контур системы непосредственно связан с реактором, имеет такое же давление (7 МПа) и находится под заполненной водой защитной оболочкой. В нормальных эксплуатационных условиях обратный клапан на холодной части контура препятствует циркуляции в основном контуре системы аварийного охлаждения, а при авариях закрывается арматура на трубопроводах первого контура, отсекая главные циркуляционные насосы и парогенераторы. В ос-

новном контуре системы аварийного охлаждения устанавливается естественная циркуляция, обеспечиваемая разностью уровней (7 м) между выходными патрубками корпуса реактора и теплообменника системы. В промежуточном контуре системы охлаждения аналогичная разность уровней равна 6 м, а давление — 3 МПа. В теплообменнике промежуточного контура, вынесенном за пределы защитной оболочки, происходит испарение воды внешнего разомкнутого контура, поступающей самотеком из бака запаса холодной воды. Пар из внешнего контура сбрасывается в атмосферу.

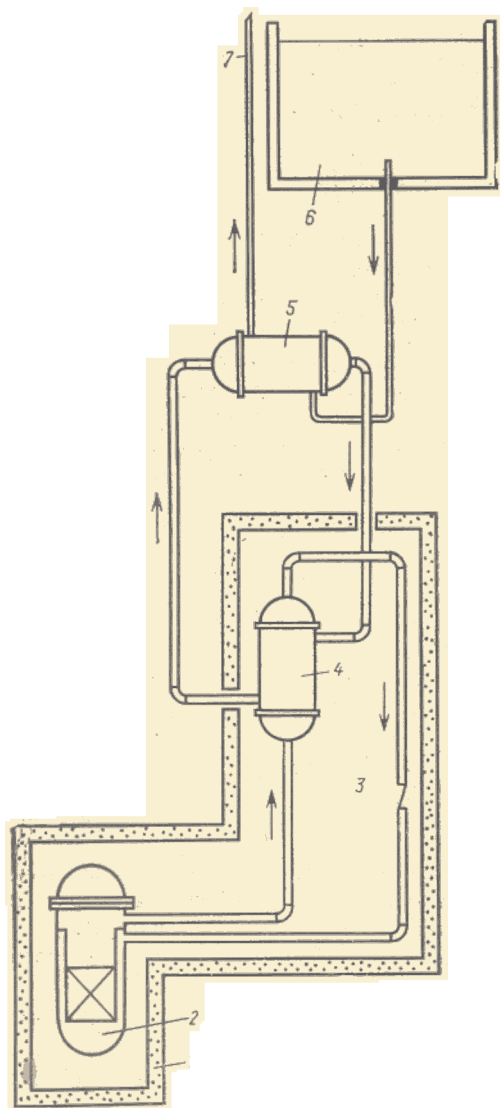


Рис. 4. Система аварийного охлаждения активной зоны реакторной установки MARS: 1 — защитная оболочка; 2 — корпус реактора; 3 — обратные клапаны системы аварийного охлаждения; 4 — теплообменник аварийного охлаждения; 5 — теплообменник промежуточного контура; 6 — бак запаса холодной воды; 7 — выпускной паропровод

Остановка и аварийное охлаждение

В работе [9] анализируется возможность повышения безопасности существующих реакторов PWR путем использования пассивной подсистемы остановки и аварийного охлаждения реактора (PSSS) вместо высоконапорной насосной подсистемы и гидроаккумуляторов аварийного охлаждения, а также системы управления и защиты реактора. Подсистема PSSS состоит из емкостей с раствором борной кислоты, каждая из которых соединена трубопроводами без арматуры с горячим и холодным участками первого контура (по одной емкости на петлю). Для того чтобы при нормальной эксплуатации раствор подсистемы PSSS находился в стационарном состоянии, предусмотрены установка дополнительных регулировочных насосов в петлях первого контура и снижение номинального напора главных циркуляционных насосов.

Исследование эффективности подсистемы PSSS проведено на примере анализа протекания аварийного режима с обесточиванием секций собственных нужд АЭС и одновременным отказом системы аварийной защиты реактора. Рассмотрен стандартный 4-петлевой реактор PWR электрической мощностью 1100 МВт с обычными системами безопасности и тот же реактор с подсистемой PSSS. Расчеты показали, что подсистема PSSS позволяет за 30 с снизить мощность реактора до уровня остаточного тепловыделения и за 50 с уменьшить давление первого контура до 7 МПа, т. е. ликвидировать аварийную ситуацию.

При авариях с потерей теплоносителя первого контура подсистема PSSS обеспечивает достаточное для сохранения герметичности твэлов охлаждение активной зоны за время до 110 с без вступления в работу низконапорной насосной подсистемы системы аварийного охлаждения. Этот период можно удлинить (предположительно до 1 сут) посредством увеличения объема емкостей подсистемы PSSS.

Преимущества подсистемы PSSS являются использование принципа пассивности, возможность срабатывания при любом давлении в первом контуре, упрощение конструкции реактора и систем безопасности, исключение возможности аварий, вызванных изменением реактивности, отсутствие вредных эффектов, сопровождающих попадание азота в первый контур. Однако пока не решены вопросы обеспечения стабильности границы раздела подсистемы PSSS / первый контур и отключения подсистемы PSSS на период пуска энергоблока. В случае сохранения аккумуляторов воды в схеме АЭС необходимо также исключить возможность залива ими опорожненных емкостей подсистемы PSSS вместо реактора.

Список литературы

1. Артамкин В. Н. АЭС средней мощности. — Атомная техника за рубежом, 1987, № 3, с. 12—16.
2. Новиков В. М., Игнатьев В. В. О концепции безопасного реактора нового поколения. — Там же, 1987, № 11, с. 3.
3. Forsberg C. A process inherent ultimate safety boiling water reactor. — Nucl. Technol., 1986, v. 72.
4. Duncan I., Sawyer C. Capitalizing on BWR simplicity at lower power ratings. — Trans. ANS, 1984, v. 47.
5. Small and simplified BWR with passive safety systems looks promising. — Nucl. Engng Intern., 1987, v. 32, N 395, p. 57—59.
6. Cruickshank A. Westinghouse simplifies the PWR. — Ibid., 1987, v. 32, N 393, p. 56—58.
7. Forsberg C. Passive emergency cooling systems for boiling water reactor (PECOS-BWR). — Nucl. Technol., 1987, v. 76, N 1, p. 185—192.
8. Caira M., Cumo M., Naviglio A. The MARS nuclear reactor plant: A inherently safe, small medium size multi-purpose nuclear plant. — Nucl. Engng Des., 1986, v. 97, N 2, p. 145—160.
9. Asahi Y., Watanabe T., Wakabayashi H. Improvement of passive safety of reactors. — Nucl. Sci. Engng, 1987, v. 96, p. 73—84.

Ключевые слова

Реакторы LWR и BWR, аварийное охлаждение, пассивный конденсатор, системы FIVES и PSSS.