

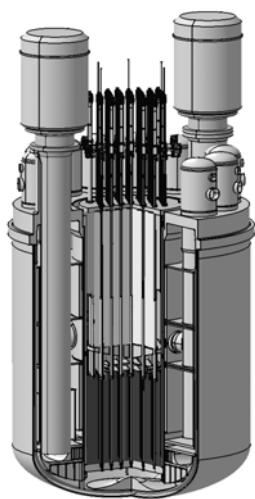
УДК 621.039.52.034.6

СВБР ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Тошинский Г.И., Комлев О.Г., Мартынов П.Н., Русанов А.Е. (ГНЦ РФ — ФЭИ, г. Обнинск),
Степанов В.С., Климов Н.Н., Дедуль А.В., Болванчиков С.Н. (ОАО ОКБ «Гидропресс»,
г. Подольск, Московская обл.)

Условием внедрения атомных станций малой мощности в региональную энергетику является их конкурентоспособность с тепловыми электростанциями. Однако обеспечить их конкурентоспособность значительно сложнее, чем энергоблоков АЭС большой мощности, поскольку при снижении мощности энергоисточника удельные капитальные затраты и себестоимость энергии возрастают гораздо интенсивнее. Одним из перспективных для региональной энергетики является свинцово-висмутовый быстрый реактор СВБР-100 [1].

Реакторная установка СВБР-100. Она разработана как унифицированная электрической мощностью 100 МВт для применения в составе модульных атомных станций или в качестве автономных энергоисточников. Ее характерными



Реакторный моноблок СВБР-100

особенностями являются:

быстрый реактор с химически инертным свинцово-висмутовым теплоносителем температурой кипения 1670 °С, плавления — 123,5 °С в первом контуре;

интегральная компоновка реактора, при которой оборудование первого контура размещено в едином прочном корпусе моноблока, с полным исключением арматуры и трубопроводов теплоносителя (см. рисунок);

реакторный моноблок с защитным кожухом в железобетонной шахте, которая заполняется

водой при полном обесточивании для пассивного отвода тепла при расхолаживании;

двухконтурная схема теплоотвода и парогенератор с многократной циркуляцией по второму контуру;

естественная циркуляция теплоносителя в теплоотводящих контурах реакторного моноблока, достаточная для пассивного расхолаживания реактора без опасного перегрева активной зоны;

значительное сокращение числа специальных систем безопасности;

модульное исполнение основных компонентов реакторного моноблока и реакторной установки с возможностью их замены и ремонта;

возможность единовременной поаксесетной выгрузки топлива по окончании кампании активной зоны и загрузки свежего топлива;

ремонт оборудования первого контура и перегрузка топлива без дренирования свинцово-висмутового теплоносителя при его поддержании в жидком состоянии за счет остаточного энерговыделения активной зоны или работы системы обогрева.

Обоснование выбора мощности реактора.

Выбор электрической мощности 100 МВт или тепловой 280 МВт, следовательно, и размеров обусловлен следующими факторами. Как показывают расчеты, это минимальная мощность, при которой достигается коэффициент воспроизводства активной зоны больше единицы при использовании смешанного уран-плутониевого топлива. Это позволяет работать в замкнутом ядерном топливном цикле в режиме топливного самообеспечения без потребления природного урана и использовать такие реакторы в крупномасштабной ядерной энергетике. Кроме того, это максимальная мощность, при которой габаритные размеры позволяют транспортировать реакторный моноблок в заводской готовности, в том числе железнодорожным транспортом, что значительно расширяет возможности выбора площадок для строительства атомных станций и существенно сокращает трудовые затраты и сроки сооружения. Выбранная мощность обеспечивает условия пассивного отвода остаточно-

го энерговыделения через корпус реакторного моноблока без опасного повышения температуры оболочки ТВЭЛов, что принципиально упрощает конструкцию реакторной установки и ее систем безопасности. Сравнительно небольшая масса моноблока для данной мощности облегчает решение задачи обеспечения сейсмостойкости реакторной установки. При данной мощности в соответствии с расчетами [2] обеспечивается продолжительность кампании ~50 тыс. эф. ч при использовании освоенного оксидного уранового топлива ($K_{BA} = 0,84$).

Опора на опыт эксплуатации и консервативный подход. Рассматриваемая реакторная технология опирается на 40-летний опыт разработки и эксплуатации транспортных установок и наземных стендов-прототипов [3]. В ходе освоения этой технологии были решены научно-технические проблемы, прежде всего коррозионной стойкости конструкционных материалов, контроля и поддержания качества теплоносителя в процессе эксплуатации. Для надежной работы необходимо измерять и поддерживать в заданном интервале всего один параметр — концентрацию растворенного в свинцово-висмутовом теплоносителе кислорода, что может осуществляться в автоматическом режиме.

Была также решена проблема обеспечения радиационной безопасности, связанная с образованием ^{210}Po при облучении нейтронами висмута. Персонал, участвовавший в работах, подвергался периодическим медицинским обследованиям, и на основе многочисленных радиометрических анализов биопроб как военного, так и гражданского персонала было установлено отсутствие инкорпорированного полония в организме людей выше допустимых пределов. Это подтверждает высокую эффективность средств индивидуальной и коллективной защиты, правильность выбора технологии и организации ремонтно-восстановительных работ [4]. Следует отметить, что для СВБР-100 течи теплоносителя исключены моноблочной (интегральной) компоновкой оборудования первого контура и наличием защитного кожуха на корпусе моноблока. Значительно снижена и вероятность утечки радиоактивного газа, поскольку давление аргона в газовой системе равно атмосферному. Ретроспективный анализ смертности среди когорты работников (около 4500 чел.), занятых на работах с ^{210}Po в 1944—1972 гг. и контролировавшихся по внутреннему облучению ^{210}Po , свиде-

тельствует об отсутствии связи между дозой внутреннего облучения за счет инкорпорированного полония до 1 Зв и смертностью по причине злокачественных образований [5]. Почти все зависимости, характеризующие смертность от различных раковых заболеваний в изучавшейся когорте работников, были отрицательны, т.е. смертность была даже немного меньше, чем в контрольных группах, не связанных с полонием.

Была также решена проблема многократного замораживания-размораживания свинцово-висмутового теплоносителя при сохранении работоспособности оборудования. Количество жидких радиоактивных отходов, как показал опыт эксплуатации, мало в связи с отсутствием необходимости дезактивации первого контура.

Внутренняя самозащищенность и пассивная безопасность. Безопасность СВБР-100 в соответствии с требованиями ИНПРО достигается за счет особенностей быстрого реактора, природных свойств свинцово-висмутового теплоносителя и интегральной конструкции реактора, что подтверждается расчетами и проработками. Реактор обладает отрицательным пустотным эффектом реактивности и отрицательными обратными связями, эффективность самого сильного поглощающего стержня не превышает долю запаздывающих нейтронов, что в совокупности с техническим исполнением системы управления и защиты исключает разгон на мгновенных нейтронах. Высокая точка кипения теплоносителя повышает надежность теплоотвода от активной зоны и безопасность в связи с отсутствием кризиса теплосъема и в сочетании с предусмотренным защитным кожухом моноблока исключает аварии с потерей теплоносителя, а также радиоактивные выбросы. Низкое давление снижает риск нарушения герметичности первого контура, позволяет уменьшить толщину стенок корпуса реактора и снизить ограничения на скорость изменения температуры по условиям термоциклической прочности. В составе реакторной установки нет материалов, выделяющих водород в результате термического и радиационного воздействия и химических реакций с теплоносителем, водой и воздухом. Схема циркуляции исключает попадание воды или пара в активную зону при течи парогенератора за счет эффективной сепарации пара на свободном уровне свинцово-висмутового теплоносителя в моноблоке.

Системы безопасности не содержат элементов, отказ которых или влияние на которые человеческого фактора могут заблокировать их срабатывание:

отвод остаточного энерговыделения при отсутствии теплоотвода через парогенераторы обеспечивается пассивно при естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя в первом контуре путем передачи тепла через корпус реакторного моноблока в воду, подаваемую в шахту моноблока, и далее за счет кипения воды с отводом пара в атмосферу (период невмешательства около 2 сут без превышения допустимой температуры);

течь парогенераторов при разрыве нескольких труб или в случае прекращения работы конденсатора газовой системы локализуется пассивно при повышении давления пара в газовой системе более 1 МПа за счет разрушения разрывной мембраны и сброса пара в барботер. Как показал опыт, малая течь не требует срочной остановки реакторной установки;

установленные в каналах, заполненных аргоном, стержни системы дополнительной аварийной защиты, не имеющие приводов на крышке реактора, пассивно срабатывают под действием силы тяжести при повышении температуры свинцово-висмутового теплоносителя выше установленной за счет плавления замков, выполненных из сплава с соответствующей температурой плавления.

Это позволяет говорить об устойчивости реакторной установки не только к отказам оборудования и ошибкам персонала и их множественному наложению, но и к злонамеренным действиям, когда все специальные системы безопасности могут быть преднамеренно выведены из строя.

Модульная структура ядерной паропроизводящей установки энергоблока. Она обладает многими достоинствами:

обеспечивает более высокую степень надежности и безопасности в сравнении с энергоблоком на базе одного реактора большой мощности;

позволяет не создавать резервный энергоисточник большой мощности для региональных атомных станций в зонах децентрализованного энергоснабжения;

при большой продолжительности работы реактора без перегрузки топлива обеспечивается коэффициент использования установленной мощности не менее 90%. При очередной остановке на перегрузку топлива или для технического обслуживания мощность энергоблока снижается в значительно меньшей степени в сравнении с энергоблоком на базе одного реактора большой единичной мощности;

обеспечивает возможность крупносерийного (конвейерного) производства реакторных моноблоков (десятки в год) и стабильную загрузку машиностроительных заводов;

позволяет использовать методы типового проектирования энергоблоков различной мощности и поточные методы организации строительство-монтажных работ;

дает возможность размещать модульные АЭС малой и средней мощности в центрах энергопотребления, что исключает затраты на сооружение мощных линий электропередачи;

обеспечивает возможность поэтапного ввода энергоблока в эксплуатацию очередями со ступенчатым наращиванием мощности по мере завершения монтажа и пусконаладочных работ на группе модулей.

Возможности многоцелевого применения.

Отмеченные качества реакторной установки СВБР-100 определяют возможности ее многоцелевого применения в виде унифицированных реакторных модулей единичной электрической мощности около 100 МВт для создания региональных АЭС и АТЭС малой и средней мощности, размещаемых вблизи городов, реновации блоков АЭС, реакторы которых исчерпали срок службы. Под реновацией понимается размещение необходимого числа СВБР-100 в освобождаемых помещениях парогенераторов и главного циркуляционного насоса, которые генерируют то же количество пара и тех же параметров, что и реакторная установка, исчерпавшая срок службы. Такие установки могут использоваться в составе ядерных опреснительных энергокомплексов или плавучих атомных станций.

Концепция коммерциализации. Несмотря на максимально возможное использование опыта эксплуатации реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем на атомных подводных лодках, эксплуатация оборудования в условиях АЭС значительно различается. Для подводной лодки характерен режим эксплуата-

ции, в основном, на низкой мощности при пониженной температуре свинцово-висмутового теплоносителя, в то время как АЭС эксплуатируется, в основном, на номинальной мощности. Кроме того, требования к безопасности и ресурсу оборудования АЭС существенно выше. Необходимо также прямое подтверждение технико-экономических показателей. Все это требует создания опытно-промышленного энергоблока. После проведения сертификационных испытаний опытно-промышленного энергоблока и подтверждения проектных характеристик СВБР-100 реакторная установка будет готова к коммерциализации и широкому применению в составе энергоблоков атомных станций различной мощности и назначения.

Заключение. СВБР-100, обладающий развитыми свойствами внутренней самозащищенности (детерминистическое исключение тяжелых аварий), позволяет обеспечить высокий уровень социальной приемлемости и расширить область применения. Модульная структура ядерной паропроизводящей установки энергоблока создает возможность перехода на передовые технологии типового проектирования энергоблоков различной мощности на базе серийно изготавливаемых в заводских условиях унифицированных реакторных модулей и поточные методы выполнения строительно-монтажных работ. Консервативный подход предопределил высокий потенциал дальнейшего совершенство-

вания реакторной установки. Федеральной целевой программой «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годов и на перспективу до 2020 года» предусмотрено создание опытно-промышленного энергоблока с СВБР-100. Для его реализации Росатом и ООО «ЕвроСибЭнерго» создали ОАО «АКМЭ-инжиниринг» — совместное государственно-частное предприятие. Опытно-промышленный энергоблок с СВБР-100 предположительно должен быть введен в эксплуатацию в 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zrodnikov A.V., Toshinsky G.I., Stepanov V.S. et al. Innovative nuclear technology based on modular multi-purpose lead-bismuth cooled fast reactors. — Progress in Nucl. Energy, 2008, v. 50, p. 170—178.
2. Тошинский Г.И., Комлев О.Г., Мельников К.Г., Новикова Н.Н. Топливный цикл реактора СВБР-100. — В сб.: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях ТЖМТ-98. Обнинск, 1999, т. 1, с. 163—170.
3. Тошинский Г.И., Степанов В.С., Никитин Л.Б. и др. Анализ опыта эксплуатации реакторных установок с теплоносителем свинец—висмут и имевших место аварий. — Там же, с. 63—69.
4. Панкратов Д.В., Ефимов Е.И., Куранов В.Д. и др. Проблема полония в ЯЭУ с теплоносителем свинец—висмут. — Там же, с. 101—110.
5. Wiggs L., Cox-De Vore C., Voelz G. Mortality among a cohort of workers monitored for Po-210 exposure: 1944—1972 y.y. epidemiology section occupational medicine group. — Health Physics, 1991, v. 61, № 1, p. 71—76.