

Разработка усовершенствованного легководного реактора в Соединенных Штатах Америки

Прорабатывается ряд конструкционных концепций

Дж.Дж. Тейлор, К.Э. Шталькопф и Ж.К. ДеВин, мл.

Институт исследований по электроэнергетике (EPRI) начал в 1983 г. осуществление широкой программы по разработке следующего поколения легководных реакторов (LWR) для включения в сети энергетических предприятий США*. Программа разработана по настоянию подразделения института, консультирующего энергетические предприятия и озабоченного тем, что без реализации такой программы эти предприятия не будут иметь усовершенствованного и жизнеспособного легководного реактора, который потребуются в конце 90-х годов для удовлетворения предполагаемого увеличения потребностей в энергии.

В основу программы положены два основных фактора:

- Функционирование сильного руководящего комитета, который должен при разработке конструкции реактора нового поколения надлежащим образом направлять усилия по осуществлению программы и обеспечивать использование опыта эксплуатации 110 действующих в стране коммерческих атомных электростанций.
- Установление с самого начала тесного рабочего взаимодействия с Комиссией по ядерному регулированию (КЯР) с тем, чтобы разрабатываемые по программе усовершенствованные легководные реакторы (ALWR) конструкции отвечали не только

Г-н Тейлор – заместитель начальника Отдела ядерной энергетики Института исследований по электроэнергетике (EPRI) в Пало Алто, Калифорния, США. Г-н Шталькопф – директор Управления разработок материалов и систем и г-н ДеВин – ведущий специалист по программам в Отделе ядерной энергетики.

* "Next Generation Light Water Reactor" by Stahlkopf, K.E., Noble, D.M., and Taylor J.J. („Следующее поколение легководных реакторов") *Proceedings of the American Power Conference*, V.48, Illinois Institute of Technology (1986). (Труды Американской энергетической конференции, том, 48, Иллинойский институт технологий, 1986 г.)

эксплуатационным требованиям энергетических предприятий, но и регламентирующим установкам КЯР, делая тем самым процесс лицензирования конечного изделия спокойным и быстрым.

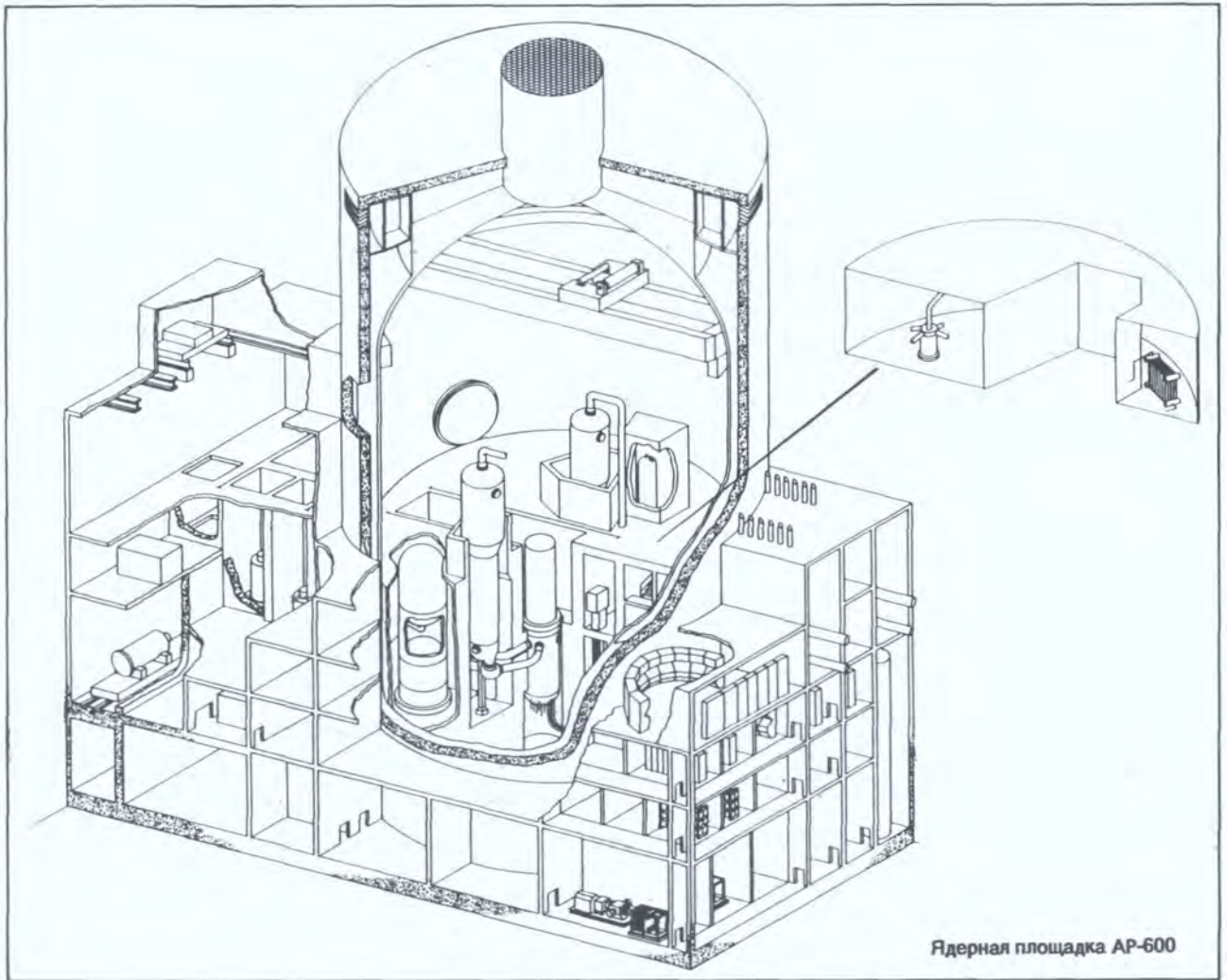
Благодаря вере создателей программы в ALWR, эта программа стала в настоящее время основным фактором в утверждении нового направления в развитии технологии LWR. Их видение нового реактора LWR вылилось в концепцию его конструкции, которая должна быть:

- существенно упрощена по сравнению с настоящими ядерными реакторами;
- прочной и эластичной, со значительным уровнем надежности;
- основана на испытанной технологии, поскольку новый реактор – „усовершенствованный" в смысле учета опыта уже действующих энергетических реакторов;
- безусловно нацелена на взаимодействие человека-машина и на потребности операторов, обеспечивающих безопасную и эффективную работу установки.

„Эволюционная установка"

Для того, чтобы соблюсти эти принципы, группа исполнителей программы по ALWR поставила перед собой задачу разработать документ о требованиях энергетических предприятий с развернутым перечнем требований к конструкции и работе реактора применительно к „эволюционной установке" ALWR*. Такая установка представляется круп-

* "US ALWR Program Set Out Utility Requirements for the Future" („Программа США по ALWR излагает требования энергетических предприятий на будущее") by Stahlkopf, K.E., DeVine J.C., and Sugnet, W.R., *Nuclear Engineering International* (November 1988), и "Light Water Cooled Reactors – Expected Developments" „Легководные реакторы – ожидаемые разработки") by Culler, F.L., Stahlkopf, K.E., and Braun, C., *Revue Roumaine de Physique* (April 1988).



Ядерная площадка AP-600

ным блоком мощностью примерно 1200 МВт_{эл.} с упрощениями и усовершенствованиями в системах безопасности и управления, а также в приборах. Это – прямой потомок современных реакторов ALWR, и в основу его систем безопасности и регламентационной базы заложены в основном уже принятые подходы. При составлении документа о требованиях разработчики ALWR работали в тесном контакте с КЯР над определением и решением наиболее серьезных проблем безопасности реактора и включением принимаемых решений в документ.

Конечной целью работы является составление полноценного и широкомасштабного документа, поддерживаемого энергетическими предприятиями и одобряемого докладом КЯР по оценке безопасности. Двенадцать из тринадцати разделов документа уже готовы, и он уже служит руководством для пользователей в США и во всем мире и оказывает влияние на конструирование реакторов, которые появятся в конце столетия.

Документ о требованиях энергетических предприятий к ALWR предусматривает усовершенствования в конструкции с точки зрения безопасности и

надежности. Сюда относятся: 1) повышенная термальная прочность; 2) повышенные требования к реактивности, т.е. достижение негативного температурного коэффициента во всем топливном цикле; 3) меньшие максимальные температуры охлаждения реактора; 4) повышенная сопротивляемость к охрупчиванию в реакторных корпусах; 5) реакторные корпуса из кольцевых поковок, исключая вертикальные швы; 6) сменяемый на месте источник питания переменного тока; 7) отвод теплоты радиоактивного распада с помощью естественной циркуляции; 8) системы отвода теплоты радиоактивного распада с увеличенным давлением; 9) увеличенные запасы охладителя; 10) более крупные и более прочные противоаварийные оболочки реактора; 11) разделение функций системы безопасности и обычных функций системы управления; 12) значительно усовершенствованные взаимосвязи человек-машина; операторские пульта должны быть более удобными для обеспечения безопасного управления.

Программа ALWR – достижение технического прогресса, центр и катализатор сотрудничества американских и международных энергетических

предприятий в области разработки конструкций своих будущих ядерных реакторов. Работы по ALWR, начатые для энергетических предприятий по программе EPRI/US, приобрели поддержку со стороны американских участников, а также финансовую и техническую поддержку ряда азиатских и европейских энергетических компаний. В настоящее время активными партнерами и участниками программы по ALWR являются „Кансай электрик“, Япония, „Тайпауэр“, Тайвань, Китай, КЕPCO, Корейская Республика, EDF, Франция; ENEL, Италия и КЕМА, Нидерланды. Синергический эффект расширяющегося международного сотрудничества США оказался весьма значительным. К программе присоединились зарубежные партнеры; ее техническое значение и доверие к ней возросли. Вместе с тем возросло влияние технических результатов программы на американских и зарубежных продавцов ядерных систем снабжения паром, что в свою очередь стимулирует еще большую американскую и международную поддержку.

„Пассивная установка“

Одновременно с работой над требованиями к эволюционной установке, исполнители программы ALWR приступили к реализации новой концепции LWR, названной ими „пассивной установкой“*. Пассивная установка представляется небольшим реактором, использующим прежде всего пассивные средства обеспечения безопасности: силу тяжести, естественную циркуляцию и запас энергии.

Концепция пассивной конструкции ALWR считается привлекательной для инвесторов энергетических предприятий по следующим соображениям:

- Фундаментальная простота концепции пассивной безопасности дает возможность осуществить значительные упрощения в виде сокращения большого числа вентилей, насосов, резервуаров, приборов и др. наряду с сокращением стоимости и сроков строительства и повышением управляемости и надежности в эксплуатации.
- Избавление от веры в активные компоненты и вмешательство человека в расчете на то, что пассивная установка сможет приспособиться к различным условиям, связанным с происходящими в ней нарушениями и внутренними и внешними аварийными ситуациями, например, потерей всех видов электропитания.

В результате исследований по пассивной установке ее мощность была определена в 600 МВт_{эл.}. Теоретически пассивная установка может быть любого размера, но номинальные мощности, превышающие 600 МВт_{эл.}, будут непрактичными или дорогостоящими в связи с крупными размерами соответствующих компонентов (корпус реактора,

резервуары для охлаждающей воды). Кроме того, преимущество небольших установок 500–600 МВт_{эл.} заключается именно в их размерах, так как они в большей степени соответствуют планам большинства энергетических предприятий США по наращиванию своих мощностей. Установки небольшого размера можно также строить в более короткие сроки; они позволяют более широко модуляризовать их оборудование, повторять кривые роста производительности и использовать другие факторы, улучшающие общие экономические показатели установки.

Первой стадией работ по пассивной установке ALWR был конкурс на лучшую конструкцию, в результате которого для дальнейшей разработки были отобраны две обнадеживающие концептуальные пассивные конструкции на 600 МВт_{эл.} – реактор с водой под давлением (PWR) и реактор с кипящей водой (BWR). Обе концепции используют пассивные системы безопасности и обещают существенные преимущества перед существующими установками. Наиболее важное из них – критерии конструкции таковы, что от оператора не потребуются вмешательства в течение трех дней после события с конструкцией для защиты установки и населения.

Вторая стадия разработки пассивной установки ALWR, проводившаяся в сотрудничестве с министерством энергетики США, включала детальную проработку принятых конструкций путем проведения технических исследований и разработки оборудования и различных систем.

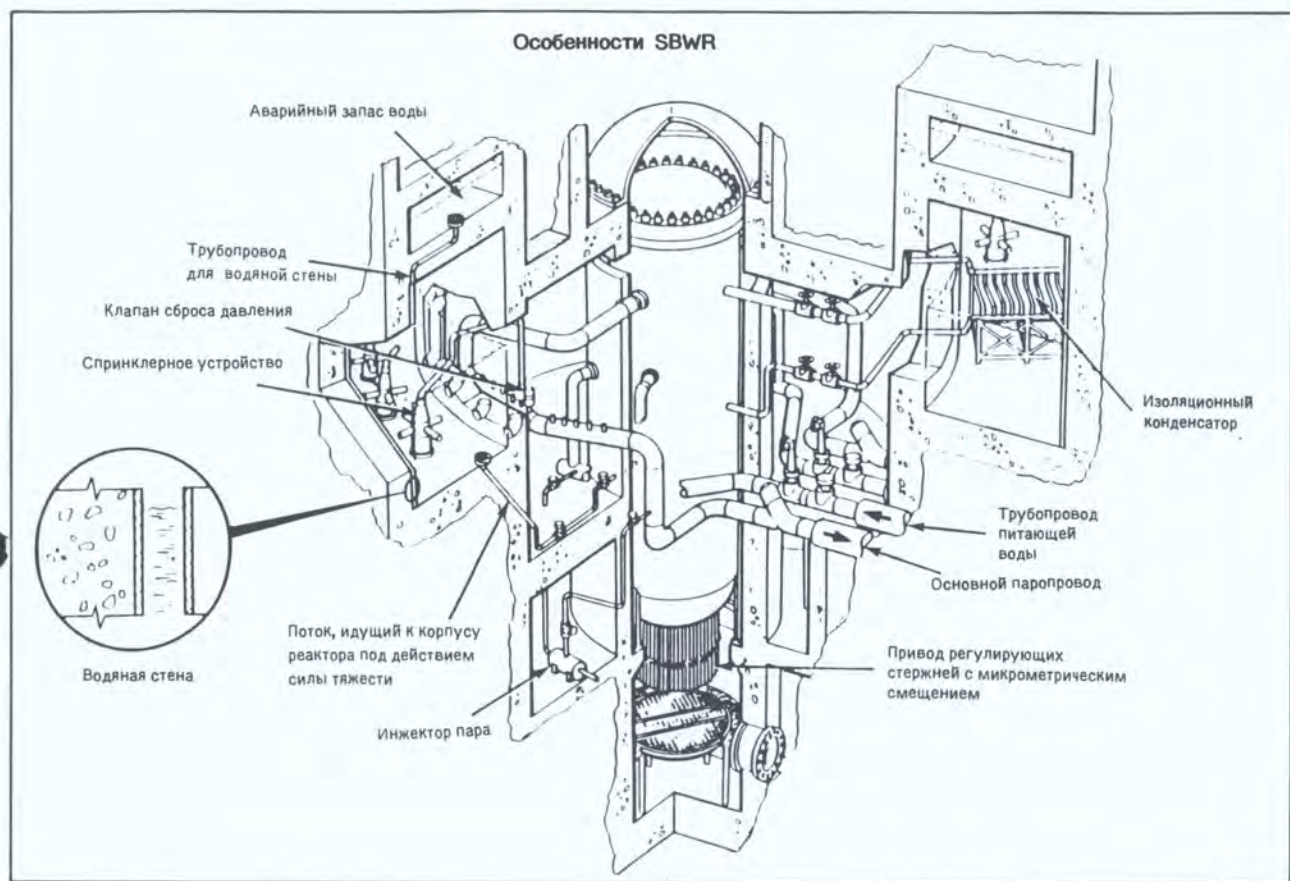
Эти конструкции пассивной установки хотя и находятся на предварительной технологической стадии, но уже имеют хорошие перспективы успешного развития. Ниже дается краткое описание концепций конструкции PWR и BWR.

Концепция конструкции PWR. Концепция пассивного PWR, известная как AP-600, разрабатывается конструкторской группой, руководимой фирмой „Вестингаус“ при поддержке фирм „Эвондейл индастриз“, „Бернс энд Роу“ и других*. В реакторе PWR мощностью 600 МВт_{эл.} важнейшее значение придается усовершенствованной конфигурации системы охлаждения реактора, которая использует насосы охлаждения реактора с герметизированными двигателями, соединенные непосредственно с выходом парогенератора (см. прилагаемый рисунок). Такая конфигурация позволяет удалить „перекрестные опоры“ из системы охлаждения реактора (COP), снижая тем самым общее сопротивление потоку в системе и улучшая рабочие характеристики при небольшой аварии с потерей теплоносителя (АПТ). Такой упрощенный подход позволяет также обеспечить единую опору для сборки, объединяющей парогенератор и насосы и упрощающей при этом конфигурацию опоры контура COP.

Большое значение придается в AP-600 теплообменнику с естественной циркуляцией, отводящему тепло радиоактивного распада из COP при полных температуре и давлении, устраняя необ-

* „The US Advanced Light Water Reactor Program – A Case for Simple Passive Safety Systems“ (Программа США по усовершенствованному легководному реактору – доводы за простые пассивные системы безопасности) by Taylor, J.J., and Stahlikopf K.E., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (May, 1988) (Труды Международного совещания по безопасности следующего поколения энергетических реакторов), Сизтл, Вашингтон (май 1988 г.)

* „AP-600 Development“ (Разработка AP-600) by Vijk R., and Bruschi, H., *Nuclear Engineering International*, 33, p. 23 (November 1988).



ходимость в системе безопасности аварийной подпитки водой с помощью насосов. Приводимая в действие под влиянием силы тяжести аварийная система охлаждения активной зоны (АСОАЗ) с резервуарами подпитки активной зоны под полным давлением, хранилищем с водой для перегрузки топлива под противоаварийной оболочкой и возможностью сброса давления устраняет необходимость в АСОАЗ с насосами.

Процесс охлаждения противоаварийной оболочки реактора осуществляется в концепции AP-600 также пассивно. Цилиндрическое стальное сооружение оболочки окружается защитным сооружением из бетона; воздушный поток, проходящий между двумя строениями удаляет тепло от противоаварийной оболочки. С наружной стороны стальной оболочки пускается вода, которая, обтекая ее, увеличивает коэффициент теплопередачи в результате испарения в течение первого дня аварии.

Эти пассивные средства обеспечивают выполнение всех необходимых функций безопасности при существенном сокращении числа необходимых насосов, вентиляций и поддерживающих систем электропитания и охлаждения.

Устранение активных аварийных систем охлаждения активной зоны с соответствующими насосами, вентилями и трубопроводами наряду с введением в конструкцию других пассивных средств позволяет значительно упростить ее по сравнению с обычными реакторами. Это упрощение позволяет отказаться в установке AP-600 от многих компонентов по сравнению с обычной атомной электро-

Количественное сравнение AP-600 и стандартного двухконтурного реактора с водой под давлением

Оборудование	Сокращение
Вентили	60 %
Крупные насосы	50 %
Трубопроводы	60 %
Теплообменники	50 %
Каналы нагрева, вентиляции и охлаждения	35 %
Объем сейсмических сооружений	60 %
Контрольный кабель	80 %

станцией с реактором фирмы „Вестингаус“ мощностью 600 МВт_{эл.} (см. прилагаемую таблицу).

Концепция конструкции BWR. Конструкторская группа, руководимая фирмой „Дженерал электрик“, а также фирмами „Бечтел“ и MIT, разрабатывает вариант BWR пассивного реактора ALWR, называемого SBWR* (см. рисунок).

* „ASBWR, An Advanced Simplified Boiling Water Reactor“ (ASBWR – усовершенствованный упрощенный кипящий реактор), by Duncan, J.D. and McCandless, R.J., and „Improvements in Boiling Water Reactor Designs and Safety (Усовершенствования в конструкциях и безопасности кипящих реакторов)“, by Wolfe, B.R. and Wilkins, D.R., *Proceedings, International Topical Meeting on Safety of Next Generation Power Reactors*, Seattle, Washington (May 1988). (Труды Международного тематического совещания по безопасности следующего поколения энергетических реакторов), Сизтл, Вашингтон (май 1988 г.)

Реактор SBWR мощностью 600 МВт_{эл.} рассчитан на удовлетворение тех же целей, что и ALWR, включая независимость действий оператора в течение трех дней после повреждения активной зоны и трех-летний срок строительства.

Реактор SBWR предназначается для работы на полной мощности без рециркуляционных насосов. Устранение этих насосов и трубопроводов обусловило более простую конструкцию реакторного корпуса, уменьшило уязвимость от событий АПТ и снизило требования к эксплуатации. Более крупный корпус реактора, требуемый для естественной циркуляции, дает дополнительное преимущество, которое заключается в наличии большого количества воды над активной зоной, что само по себе хорошо при возникновении любых аварийных ситуаций.

Средства безопасности реактора SBWR отличаются изобретательностью и в то же время очень просты. Они включают: систему охлаждения активной зоны стоком под действием силы тяжести в случае аварии с потерей теплоносителя; систему инъекции пара, использующую остаточный пар в качестве движущей силы для инжектирования воды в реактор и возмещения утечки при отключении электроэнергии переменного тока; изоляционный конденсатор, располагаемый в поднятом водном резервуаре и обеспечивающий отвод остаточного тепла с помощью естественной циркуляции и оболочку по типу устранения давления, пассивно охлаждаемую в аварийных условиях.

Пассивные средства безопасности в реакторах AP-600 и SBWR дают возможность приспособиться ко всем событиям в конструкции. При этом отпадает необходимость в аварийном дизельном генераторе или в системе распределения класса 1E AC.

Безопасный интегрированный реактор

Помимо разрабатываемых по программе EPRI и министерства энергетики реакторов SBWR и AP-600 в движении за создание усовершенствованного пассивного легководного реактора появился еще один претендент – безопасный интегрированный реактор (БИР). Он разрабатывается совместно фирмами „Комбасчен инжиниринг“, „Роллс Ройс энд эссошиейтс“, „Стоун энд Вебстер инжиниринг корпорейшн“ и Управлением по атомной энергии Великобритании.* В этой концепции используется первичная система охлаждения, в которой активная зона реактора, компенсатор объема и парогенераторы находятся в одном реакторном корпусе под давлением, а насосы охлаждения реактора устанавливаются сбоку корпуса, что делает ненужными трубопроводы первичного контура, характерные для обычных реакторов с водой под давлением (см. рисунок упрощенной конструкции).

Система безопасности БИР пассивна и основана на естественной циркуляции и на большой тепловой мощности, а не на активном оборудовании и электроэнергии переменного тока. Мощность реак-

тора БИР – 325 МВт_{эл.} Она лимитируется практическими требованиями строительства и транспортировки реакторного корпуса, который содержит не только активную зону, но и все системы первичного контура. У реактора БИР имеется несколько уникальных особенностей; в том числе защитная оболочка и 12 цилиндрических прямооточных парогенераторов, из которых требуется только 11 для достижения полной мощности.

Реактор БИР управляется с помощью регулирующих стержней и сгораемых ядов с традиционным для PWR компенсационным стержнем из бора, устраняемым в целях упрощения системы и защиты от коррозии. Хотя разработчики БИР не участвуют в программе EPRI и министерства энергетики по ALWR, они заявили о своем намерении принять требования к пассивному реактору LWR; разрабатываемому по программе ALWR.

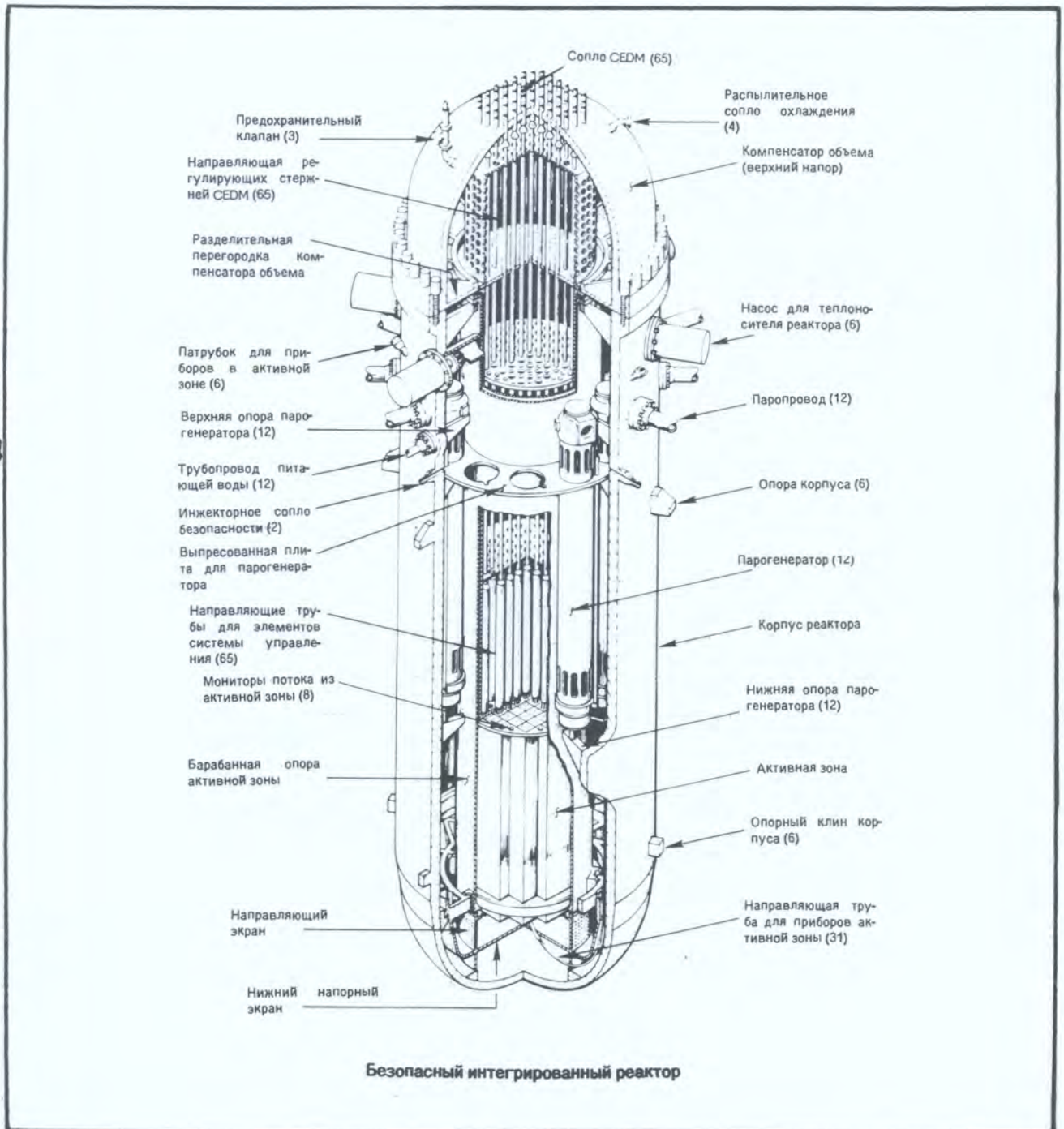
Первоначально разработка пассивной установки была привлекательной, но неприоритетной частью программы ALWR. Она представлялась обнадеживающей концепцией, но требующей значительной проработки и, что еще важнее, фундаментального сдвига в технической философии и направлении конструирования реакторов. Однако, когда работа началась, у энергетических предприятий США и в других странах мира проявился интерес к этой программе. Две первые стадии работ оказались в техническом отношении очень успешными и породили надежду на еще большие результаты в дальнейшем. Созданные проекты реактора полностью соответствовали их видению и техническим принципам Руководящего комитета по созданию ALWR, установленным с начала осуществления программы. При прочной конструкции и консервативных уровнях ее надежности пассивные установки могут быть значительно упрощены по сравнению с сегодняшними реакторами. Они обеспечивают проявление „дружелюбия к оператору“, предоставляя ему длительные передышки, прежде чем от него потребуются принятие мер в случае каких-либо нарушений или аварии. В то же время они основаны на принятых принципах и испытанной технологии, поскольку пассивный реактор – это „возвращение к базовой конструкции“, учитывающей уроки (некоторые из них временно забытые), извлеченные после появления технологии LWR.

По завершении настоящей стадии работ (вторая стадия пассивной установки) в первой половине 1990 г., концепция пассивной установки станет предметом тщательного изучения. Документ о требованиях к пассивной установке ALWR будет завершен, и его утвердит Руководящий комитет по ALWR. Будут разработаны регламентационные основы пассивной безопасности.

Будут завершены разработки концептуальных конструкций для создания пассивных установок. Это составит превосходную основу для дальнейших разработок пассивных установок. Однако потребуются выполнить большой объем работ, прежде чем пассивная установка станет привлекательной для вкладчиков как с технической точки зрения, так и с точки зрения лицензирования.

Продолжение программы – третья стадия разработки пассивной установки – необходимо для того, чтобы довести ее до уровня, на котором ALWR действительно стала бы жизнеспособным вариантом, отвечающим требованиям энергетических

* „The SIR Project“, by Hayns M. Atom (June 1989) (Проект БИР).



Безопасный интегрированный реактор

предприятий, регламентирующих органов и общественности, и здоровой основой для капиталовложений энергетических предприятий.

Будущие направления

EPRI и министерство энергетики работают над продолжением программы создания пассивной установки ALWR. Министерство энергетики приступает к работе над сертификацией конструк-

ций пассивных установок, рассчитывая на финансовое участие промышленности. EPRI и Руководящий комитет по ALWR создают международное партнерство энергетических предприятий, работающих вместе над конструкцией и разработкой пассивно прочных ALWR. Цель этой координированной программы – довести концепции конструкций пассивных установок до уровня „готовности к инвестициям“. Конкретными результатами третьей стадии должны быть:

- понятный и стабильный набор регламентацион-