

КОНЦЕПЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ КОМПОНОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

*Денискин В.П., Дмитриев А.М., Наливаев В.И., Федик И.И. (НИИ НПО «Луч»),
Гаврилов П.М. (Горно-химический комбинат), Пискунова Н.А., Хренников Н.Н.
(НТЦ по ядерной и радиационной безопасности)*

Развитие ядерной энергетики требует рассмотрения и разработки инновационных проектов реакторов, обладающих повышенным уровнем безопасности за счет внутренне присущих им свойств и позволяющих обеспечить высокие экономические показатели. Одним из интересных и перспективных предложений является использование в качестве теплоносителя твердого вещества [1].

Использование твердого теплоносителя для охлаждения активной зоны ядерного реактора имеет значительные преимущества, среди которых возможность движения теплоносителя в активной зоне под действием сил тяжести и отсутствие необходимости иметь избыточное давление в корпусе, что в свою очередь означает малую металлоемкость установки, снижение риска аварийных режимов и масштаба их последствий. Охлаждение активной зоны реактора с помощью твердого вещества возможно при выполнении определенных условий, связанных с особенностями твердого теплоносителя. Важнейшими требованиями являются его равномерное неразрывное движение с минимальным колебанием плотности на всех участках активной зоны, высокая механическая прочность и износостойкость частиц, а также хорошие показатели теплообмена, т.е. высокая теплопроводность и теплоемкость материала теплоносителя при рабочих условиях, характерных для активной зоны ядерного реактора.

Исследования по изучению возможности использования твердого теплоносителя на основе мелкодисперсных частиц графита для охлаждения активной зоны теплового реактора позволили выявить конкретные условия, необходимые для выполнения основных требований к твердому теплоносителю. Результаты исследований кратко изложены в работе [2]. Для доказательства способности предложенного теплоносителя двигаться под действием силы тяжести плотным слоем с высокой скоростью и изучения износостойкости частиц в НИИ НПО «Луч» проведен комплекс экспериментальных работ. Результаты исследований подтвердили возможность равномерного неразрывного движения под

действием сил тяжести твердого теплоносителя на основе сферических частиц графита с пироуглеродным покрытием средним диаметром 1 мм. При использовании такого теплоносителя в активной зоне ядерного реактора могут быть достигнуты скорости теплоносителя и коэффициенты теплопередачи, позволяющие реализовать плотность энерговыделения, характерную для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. Таким образом, было показано, что идея использования твердого теплоносителя принципиально может быть реализована для высокотемпературного теплового реактора.

В настоящей статье приведены концептуальные предложения по высокотемпературному реактору с твердым теплоносителем, изложены некоторые его особенности и предлагаемые с их учетом конструкторские решения.

Использование твердого теплоносителя для охлаждения активной зоны ядерного реактора ставит некоторые требования к его конструкции. В частности, как следует из экспериментальных и расчетных данных [3], для свободного (без клина) движения шарообразных частиц теплоносителя в круглом канале и удержания постоянной плотности (пористости) теплоносителя отношение $N = d_k/d_t$ диаметра канала d_k к диаметру теплонесущей частицы d_t должно лежать в определенных пределах: $N > 7$. Это значит, что при среднем диаметре частиц твердого теплоносителя $d_t = 0,9\text{—}1$ мм шаг решетки твэлов, а в рамках консервативного подхода и любое расстояние между неподвижными элементами активной зоны или теплообменного оборудования должны быть не менее 10 мм. Отсюда возникает ограничение на возможное уран-графитовое отношение в активной зоне реактора.

Интенсификации теплообмена способствует увеличение скорости движения твердого теплоносителя. Однако при высоких скоростях поток сильно разрыхляется, образуя несвязное течение, что приводит к резкому снижению коэффициента теплоотдачи и замедляющей способности потока. Для связного течения теплоносителя с постоянной плотностью его скорость не должна превышать некоторого критического значе-

ния $V_{кр}$, для оценки которого в работе [4] рекомендовано соотношение

$$V_{кр} = (1,4—2,6) d_3^{0,5}, \quad (1)$$

где d_3 — эквивалентный гидравлический диаметр кольцевого канала. При рассмотрении продольного обтекания бесконечной решетки твэлов эквивалентный диаметр можно вычислить по формуле $d_3 = d_{тв}(kx^2 - 1)$, где $d_{тв}$ — диаметр твэла, м; $x = s/d_{тв}$ — относительный шаг; s — шаг решетки, м; $k = 1,27$ для квадратной и $k = 1,103$ для гексагональной решетки твэлов [5].

Учитывая важность связного движения теплоносителя, в НИИ НПО «Луч» выполнены эксперименты по определению критической скорости течения в круглой трубе диаметром 1 см при среднем диаметре частиц $d_t \sim 0,9$ мм и реальных эксцентриситетах в диапазоне $\pm 20\%$ [2]. В эксперименте $V_{кр} \sim 0,22$ м/с, что хорошо сходится с расчетом по формуле (1).

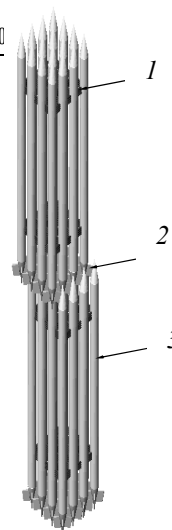
К настоящему времени сформулированы следующие предложения по концептуальным решениям для высокотемпературного ядерного реактора с твердым теплоносителем (ВРТТ).

Активная зона. Она составляется из сравнительно коротких вертикально расположенных твэлов цилиндрической формы, снабженных в верхней и нижней частях обтекателями (рис. 1).



Р и с. 1. Твэл: 1 — верхний обтекатель; 2 — топливный компакт; 3 — оболочка; 4 — элемент вертикального дистанционирования

Твэлы собираются в сборку таким образом, что каждый нижний слой расположен по отноше-

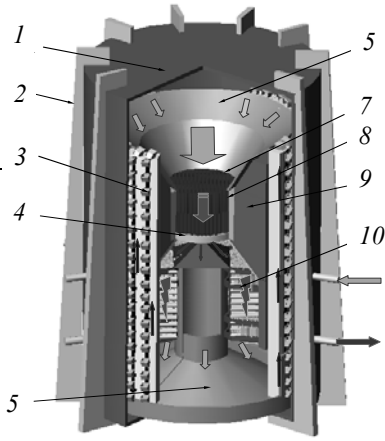


нию к верхнему со сдвигом, так что нижний слой располагается в середине пространства под Р и с. 2. Фрагмент ТВС: 1 — горизонтальный дистанционирующий элемент; 2 — элемент вертикального дистанционирования; 3 — твэл

теплоноситель верхнего слоя (рис. 2). Дистанционирующие и стягивающие элементы, с помощью которых твэлы собираются в сборку, расположены таким образом, чтобы оказывать минимальное сопротивление потоку теплоносителя и в то же время способствовать его турбулизации. Активная зона собирается свободной постановкой ТВС в пространство между направляющими трубами из графитовых материалов, предназначенными для размещения поглощающих стержней системы управления реактором и образующими силовой каркас активной зоны с фиксацией через дистанционирующие элементы.

Предложенная конфигурация элементов активной зоны позволяет при высокой скорости теплоносителя иметь безразрывный равномерный по плотности поток и обеспечивает его эффективную турбулизацию с минимальными потерями на трение.

Реакторная установка. Активная зона и оборудование первого контура циркуляции теплоносителя размещаются в едином корпусе, заполненном гелием. Его давление в рабочем режиме реактора составляет около 0,09 МПа, т.е. немного ниже атмосферного. Схема компоновки реактора приведена на рис. 3. Соответственно внутри общего корпуса расположены верхний питающий бункер с запасом теплоносителя, активная зона, окруженная боковым отражателем из графита толщиной ~ 1 м, и боковая биологическая защита толщиной около 6 м из материалов, способных длительно выдерживать высокую температуру. Теплоноситель в бункере с



толщиной его слоя 6—7 м играет роль верхнего отражателя и первичной защиты от нейтронов и γ -излучения. Ниже активной зоны симметрично относительно ее вертикальной оси располагают-

Р и с. 3. Реакторная установка: 1 — корпус; 2 — опоры; 3 — подъемники теплоносителя; 4 — многодырчатый шибер; 5, 6 — нижний и верхний бункер для теплоносителя соответственно; 7 — активная зона; 8 — отражатель; 9 — биологическая защита; 10 — теплообменники

ся вторичные теплообменники. Теплоноситель первого контура проходит по наружной стороне трубных пучков, вторичный теплоноситель — внутри трубной системы с выходом коллекторов вторичного теплоносителя из пространства корпуса через его стенку.

Поскольку для предлагаемого реактора теплоноситель является замедлителем нейтронов, выбором параметров топливной загрузки можно добиться того, что эффект потери теплоносителя (без учета температурного эффекта) окажется достаточным для перевода реактора в подкритическое состояние в отсутствие воздействия на него стержней аварийной защиты или каких-либо других внешних средств управления реактивностью. Естественно, это условие должно выполняться для всех режимов и этапов работы реактора. Дополнительное, но обязательное требование — в процессе потери теплоносителя эффективный коэффициент размножения не должен проходить через максимум. Для реализации описанного свойства реактора при потере теплоносителя переходить в подкритическое состояние в его конструкции ниже теплообменников предусмотрены дополнительные емкости для теплоносителя — нижние бункеры, с нижнего уровня которых подъемники забирают теплоноситель для подачи в верхний бункер. Нижние бункеры выполнены в виде емкостей с наклоном стенок в сторону прямиков устройств перемещения теплоносителя таким образом, что угол наклона стенок бункера везде больше угла естественного откоса твердого теплоносителя к горизонту. Объем нижних бункеров предусмотрен таким, чтобы в нем мог разместиться весь теп-

лоноситель из верхнего бункера и активной зоны.

Ниже активной зоны расположен многодырчатый шибер, представляющий собой дырчатую диафрагму с характерным размером отверстий $\sim 20 d_t$, где d_t — средний диаметр теплонесущих частиц. Отверстия в шибере не имеют клапанов или других движущихся частей. Суммарная площадь отверстий шибера составляет (для различных компоновок активной зоны) 0,8—0,98 площади проходного сечения активной зоны. Шибер позволяет корректировать размеры отверстий в момент его установки или при выполнении ремонтных работ. Многодырчатый шибер выполняет две задачи. Наличие системы большого числа сравнительно небольших отверстий обеспечивает равномерный выход теплоносителя из объема активной зоны, а также позволяет иметь меньшую скорость его выхода из периферийных районов активной зоны, обладающих меньшей мощностью, что важно для профилирования поля температуры на выходе из реактора. Вторая задача состоит в гарантированном подавлении явления разрыхления потока твердого теплоносителя при скорости выше критической. Многодырчатый шибер является основным сопротивлением, ограничивающим скорость теплоносителя в активной зоне.

Для пассивного расхолаживания реактора после ухода основного теплоносителя в нижние бункеры от верхнего уровня теплообменников до шибера предусмотрено свободное пространство, предназначенное для естественной циркуляции гелия в корпусе реактора.

Приведенные концептуальные решения позволяют реализовать основные преимущества использования твердого вещества для охлаждения активной зоны при соблюдении описанных требований к конструкции реактора. При авариях, связанных с полной потерей теплоносителя, реактор будет обладать свойством внутренней самозащищенности, перейдет в подкритическое состояние. При этом будет обеспечиваться его пассивное расхолаживание.

Для подтверждения возможности конструкторской реализации предложенных концептуальных решений приведем некоторые оценочные данные для конкретного реактора, совпадающего по основным параметрам с описанным в работе [2]. При тепловой мощности 3450 МВт

и электрической 1500 МВт (брутто) параметры активной зоны и основных элементов корпуса следующие.

ТВЭЛы на основе микротвэлов цилиндрической формы внешним диаметром 20 мм (под топливный компакт диаметром 1,25 см, разработанный для реактора ГТ-МГР) собираются в решетку с шагом 32 мм. Высота активной части твэла 35 см, с учетом двух обтекателей конической формы габаритная высота составляет 43 см. Геометрические параметры топливного компакта приняты такими же, как и для ГТ-МГР, с учетом практической проработанности технологии. Тепловыделяющие элементы собираются в ТВС в квадратную решетку 16×16 в два слоя по высоте. Шаг решетки СУЗ 512 мм. Активная зона содержит 2360 ТВС, расположенных вертикально по восемь в 295 столбах. Активная зона имеет диаметр 10, габаритную высоту 5,68 м, при этом высота по топливу составляет 5,6 м.

Верхний бункер содержит запас теплоносителя объемом около 550 м³. Объем теплоносителя в активной зоне до дырчатогошибера (с учетом пространства от низа твэлов дошибера ~15 см) составляет ~310 м³. Нижешибера предусмотрено наличие свободного пространства (~3,5 м между низом активной зоны и верхним уровнем теплообменников) для организации циркуляции газа через активную зону после ухода основного теплоносителя, что дает дополнительный объем ~190 м³, занимаемый теплоносителем. Таким образом, дополнительные сборники теплоносителя (нижние бункеры) должны иметь объем ~1050 м³.

Вторичные теплообменники в количестве четырех располагаются симметрично относительно вертикальной оси активной зоны с удалением от центра реактора примерно на 4 м. Нижние сборники теплоносителя находятся прямо под теплообменниками и имеют примерные размеры 10×5×8 м. В режиме стационарной работы реактора количество теплоносителя в верхнем бункере поддерживается на уровне 6—7 м регулировкой скорости забора теплоносителя из прямиков подъемников. Нижние бункеры при этом почти пусты и играют роль транзитных каналов, по которым теплоноситель после прохождения теплообменников попадает в прямки подъемников.

Корпус реактора, заполненный гелием, имеет форму цилиндра высотой 58, диаметром 36 м.

Реальное влияние гелия на теплоотдачу к твердому теплоносителю велико, однако почти не зависит от давления выше 0,03 МПа. При останове и расхолаживании реактора давление гелия снижается по мере охлаждения до 0,07 МПа. При этом отсутствует необходимость в системе регулирования массы гелия в корпусе в зависимости от уровня мощности реактора.

Расчетное исследование нейтронно-физических свойств активной зоны высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем и топливом на основе UO₂ проводилось с помощью программного комплекса UNK 4.0, разработанного в РНЦ «Курчатовский институт» и позволяющего учесть эффект двойной гетерогенности размещения топлива в ячейке. В качестве расчетной модели рассматривалась бесконечная по высоте полячейка, содержащая четыре ТВС с разным выгоранием топлива, т.е. имитировались равномерно-частичные перегрузки один раз в год.

Полученные результаты показали, что при эффективном шаге решетки твэлов 3,5 см, загрузке микротвэлов в компакт 25% по объему, радиусе зерна микротвэла 350 мкм и обогащении топлива 15% кампания составляет 4 года, максимальное выгорание топлива 155 ГВт·сут/т. Для компенсации избыточного начального запаса реактивности требуется добавление в топливо 0,5% эрбия.

Из табл. 1 следует, что эффект полной потери теплоносителя оказывается достаточным для перевода реактора в подкритическое состояние ($K_{эф} < 0,98$) во всех случаях, т.е. для горячего и холодного состояния, начала и конца кампании. С уменьшением плотности теплоносителя реактивность уменьшается монотонно, не переходя через максимум. В расчетах утечка нейтронов оценивалась 3%. Температурные коэффициенты реактивности также имеют отрицательные значения в течение всего времени облучения топлива в полячейке.

При проведении расчетов плотность теплоносителя задавалась характерной для его динамического состояния. Если бы конструкция реактора позволяла образование стационарной запылки теплоносителя в активной зоне, то плотность теплоносителя в таком случае возросла на 1,5—3%, что, как показал расчет, привело бы к росту реактивности примерно на 0,3%. Од-

Таблица 1. Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде K_∞ для полиячейки на начало и конец кампании

Состояние	Кампания	
	Начало	Конец
Горячее:		
с теплоносителем	1,24	1,05
без теплоносителя	0,88	0,72
Холодное:		
с теплоносителем	1,34	1,08
без теплоносителя	0,99	0,78

нако принятая концепция свободного вытекания теплоносителя из активной зоны в нижние бункеры и соответствующим образом выбранные конструкционные параметры исключают возможность образования в активной зоне реактора стационарной засыпки теплоносителя в существенном объеме и следующего за этим повышения реактивности. Полученные результаты демонстрируют возможность достижения высокого уровня безопасности в таком реакторе.

В табл. 2 приведены некоторые показатели ВВЭР-1000 тепловой мощностью 3012 МВт и ВРТТ тепловой мощностью 3450 МВт. Как видно, урановый топливный цикл ВРТТ характеризуется меньшим расходом природного урана. Разница в потреблении природного урана на выработку одинакового количества тепловой энергии составляет в первом приближении 13%. Реальная топливная экономия определяется также термодинамическим к.п.д., который оценивается для ВРТТ ~45%. Если принять к.п.д. ВВЭР-1000 33%, то общая экономия природного урана при выработке электроэнергии составит ~50%.

Таблица 2. Некоторые показатели ВВЭР и ВРТТ при КИУМ = 1, нулевых потерях на предприятиях ЯТЦ, остаточном обогащении гексафторида урана 0,002

Показатель	ВВЭР	ВРТТ
Обогащение по ^{235}U , %	4,4	15
Энерговыработка, ГВт·сут/т	40	155
Топливо:		
удельная загрузка, т/ГВт	27,3	9,2
удельный расход, т/(ГВт·год)	9,1	2,3
Удельный расход природного урана, т/(ГВт·год)	74,6	66,2

После останова реактора для плановой перегрузки топлива основная система охлаждения остается в работе 3—4 ч. В течение этого времени мощность снижается до 0,5% номинальной. После этого подъемники теплоносителя останавливаются, и теплоноситель перетекает в нижние бункеры. При опустошении активной зоны эффективный коэффициент размножения снижается до глубокоподкритического. Для расхолаживания включаются вентиляторы циркуляции гелия через корпус реактора. ТВС представляются в среде гелия в отсутствие основного теплоносителя в пространстве активной зоны.

После завершения перегрузки реактора при опущенных стержнях системы управления и защиты включаются подъемники твердого теплоносителя и происходит последовательное заполнение активной зоны и верхнего бункера. Подъемники теплоносителя должны иметь резерв по мощности подъема в 1,2—1,5 раза по отношению к режиму стационарной работы. При резерве мощности на подъем в 1,5 раза процесс заполнения активной зоны и верхнего бункера до рабочей отметки 6 м занимает около 30 мин, после чего расход на подъем теплоносителя уменьшается до стационарного.

В заключение еще раз отметим, что предложенные концептуальные решения по компоновке активной зоны и реактора в целом позволяют реализовать следующие важные преимущества использования твердого теплоносителя в высокотемпературном реакторе: низкая стоимость установки, возможность строительства в короткие сроки, простота эксплуатации, хорошие показатели использования топлива, высокий уровень безопасности, отсутствие жидких радиоактивных отходов.

Изучение возможности создания высокотемпературного ядерного реактора с твердым теплоносителем на основе пиролитического графита находится на стадии поиска концептуальных решений. Исследования не выявили до настоящего времени проблем, которые могли бы препятствовать реализации этой идеи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А.М., Денискин В.П., Наливаев В.И. и др. Ядерный энергетический реактор. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2001, № 13-01, с. 209—215.
2. Денискин В.П., Дмитриев А.М., Наливаев В.И. и др. Некоторые результаты исследования и перспективы

- развития высокотемпературного реактора с твердым теплоносителем. — Атомная энергия, 2005 т. 99, вып. 5, с. 358—365.
3. **Богоявленский Р.Г.** Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978.

4. **Горбис Э.Р., Календерьян В.А.** Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями. М.: Энергия, 1975.
5. **Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.** Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в Редакцию 18.06.07

УДК 621.039.564.5

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ФОНОВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ ГЦК ВВЭР-1000

*Морозов С.А., Ковтун С.Н., Бударин А.А., Дворников П.А., Швецов Д.М., Кудряев А.А.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского), Белоусов П.А. (Обнинский гос. техн. ун-т
атомной энергетики)*

Акустический шум, генерируемый при течении жидкости под высоким давлением, несет информацию о разгерметизации циркуляционных контуров ВВЭР. Базирующиеся на этом эффекте акустические методы диагностики имеют два важных преимущества: они являются быстродействующими и в принципе позволяют оценить размер и координаты течи.

Возможны два способа реализации акустического метода — контактный, когда информационным признаком является интенсивность (спектральный состав) волн напряжения на поверхности трубопроводов и корпусов оборудования, генерируемых истекающей парожидкостной средой, и чисто акустический, связанный с регистрацией низкочастотных волн акустического давления в воздушной среде вблизи контролируемого оборудования. В силу некоторых причин на АЭС с ВВЭР получил распространение контактный акустический метод.

Особенностью реакторной установки как источника акустических шумов является сложность протекающих в ней процессов с множеством трудно учитываемых связей — это процессы механические, гидродинамические, вибрационные, ударные, связанные с генерацией и барботажем пара, и др. Все это порождает множество акустических источников, которые тем образом, сигналы 53 акустических датчиков дают достаточно полную информацию о работе реакторной установки. Заметим, что датчики GT-400 являются узкополосными, их наивысшая чувствительность лежит в диапазоне 70—250 кГц.

действуют в различных диапазонах частот, зависящих от режима работы установки, состава оборудования и других факторов. Естественно, без изучения характеристик этих шумов, выявления их основных источников нельзя надеяться на обнаружение протечек теплоносителя.

В публикациях, посвященных диагностированию разгерметизации контуров АЭС, фоновым акустическим шумам не уделялось должного внимания. Поэтому настоящая статья заинтересует специалистов, работающих в области акустического течеискания.

В 2005 г. на 3-м блоке Калининской АЭС с ВВЭР-1000 была сдана в опытную эксплуатацию акустическая система контроля течей теплоносителя 1-го контура САКТ [1]. На каждой из четырех петель теплообмена установлено по восемь контактных акустических датчиков волноводного типа GT-400 [2] (по три на участках реактор—ГЦН и ГЦН—парогенератор, по два — на участках реактор—парогенератор). По четыре таких же датчика размещено на корпусе компенсатора давления и трубопроводе впрыска, три датчика — на соединительном трубопроводе компенсатора давления, четыре датчика установлены на трубопроводе сброса и импульсных предохранительных клапанах, шесть — на трубопроводах САОЗ (рис. 1). Та-

Мерой интенсивности акустического шума является усредненный за 1 с среднеквадратичный сигнал датчика, который регистрирует и обрабатывает САКТ. Собственные шумы измерительных каналов составляют 1 мкВ.

В настоящей статье на качественном уровне рассматриваются взаимосвязи и интенсивность