

# РЕАКТОРЫ С ТЯЖЕЛЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ И НЕКОТОРЫЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ НИХ

**А.В. Жуков, Ю.А. Кузина, В.И. Белозеров**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Рассматривается проблема внутренней присущей безопасности реакторов с тяжелыми теплоносителями на примере проектов реакторов БРЕСТ-ОД-300 и СВБР-100. Даются основные характеристики этих реакторов. Приводятся результаты предварительного теплогидравлического расчета центральной ТВС активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300 (треугольная решетка твэлов). Подробно описывается конструкция теплогидравлической модели для намечаемых экспериментальных исследований активной зоны реактора СВБР-100.

**Ключевые слова:** внутренне присущая естественная безопасность, реактор, активная зона, свинец, свинец-висмут, теплогидравлический расчет, теплогидравлическая модель, имитатор твэла, имитатор СУЗ.

**Key words:** inherent natural safety, reactor, core, lead, lead-bismuth, thermohydraulic calculation, thermohydraulic mode, simulator of fuel elements, simulator of elements of reactor control and safety system.

## **ВНУТРЕННЕ ПРИСУЩАЯ ЕСТЕСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РЕАКТОРОВ, ОХЛАЖДАЕМЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ**

Одним из главных вопросов, в значительной мере определяющих конструкцию реакторов на быстрых нейтронах, является выбор теплоносителя. Теплоноситель должен слабо замедлять нейтроны, иметь малую наведенную активность и быть радиационно стойким. Кроме того, он должен удовлетворять таким теплофизическим свойствам, как высокая теплопроводность, умеренная вязкость, высокая температура кипения при атмосферном давлении, термостойкость и т.д. В наибольшей степени указанные свойства сочетаются в натрии, который был выбран в качестве теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах, созданных в 1970–1980-ые гг. Единственным существенным недостатком натрия является его высокая активность по отношению к воде и кислороду, что приводит к дополнительным затратам при оснащении реакторов системами безопасности.

В последнее время считаются перспективными такие тяжелые теплоносители, как свинец, эвтектический сплав свинец-висмут [1, 2].

Свинец и свинец-висмут не вступают во взаимодействие с водой и воздухом, радиационно стойки, слабо активируются, имеют большую температуру кипения (1740 и 1670°C соответственно), практически недостижимую при любых авариях

© *А.В. Жуков, Ю.А. Кузина, В.И. Белозеров, 2011*

(в отличие от натрия с температурой кипения 883°C). В реакторах точка кипения теплоносителя может достигать 2300°C вследствие более высокого давления в активной зоне. Удельная теплота на единицу объема этих теплоносителей примерно такая же, что у натрия, но теплопроводность примерно в четыре раза меньше.

Реакторы, охлаждаемые свинцом, рассматриваются прежде всего как базовая технология для энергетического производства в условиях крупномасштабной ядерной энергетики и как основная технология для решения проблемы отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов и только во вторую очередь – как источник топлива для тепловых реакторов в области их максимального использования [3]. Одним из решений, удовлетворяющих данную потребность, является проект реактора БРЕСТ-ОД-300 [4–6].

Сочетание природных свойств свинца, мононитридного топлива (UN+PuN), физических характеристик быстрого реактора, конструкторских решений активной зоны и контуров охлаждения приводит к выбору этого теплоносителя для БРЕСТ-ОД-300, обеспечивающего его безопасность и устойчивость эксплуатации. Протекание процессов, связанных с потерей герметичности первого контура и с межконтурными течами в парогенераторе (ПГ), при использовании свинца происходит без выделения водорода и экзотермических реакций. В связи с вышесказанным, энергетические установки типа БРЕСТ рассматриваются как установки, удовлетворяющие принципу **внутренней присущей естественной безопасности**.

На основании этого принципа, практически не отходя от освоенных технических решений и материалов, можно создать в ограниченные сроки ядерную технологию, отвечающую современным требованиям, предъявляемым обществом к развитию атомной энергетики. Этим требованиям отвечают быстрые реакторы, работающие на топливе равновесного состава с  $K_{\infty} \approx 1,0$ , при использовании плутония только из отходов ядерного топлива (низкофоновый плутоний вместо энергетического).

Преимущества быстрых реакторов определяются свойствами внутренней самозащищенности, удовлетворяющими самым высоким требованиям безопасности в отношении тяжелых аварий (включая терпимость к ошибкам персонала и устойчивость к отказам оборудования). В качестве примера перечислим основные преимущества реакторов типа БРЕСТ:

- использование плотного теплопроводного топлива и химически пассивного с высокой температурой кипения свинца исключает аварии, связанные с кризисом теплосъема в активной зоне, и обеспечивает возможность поддержания низкого давления в первом контуре в режимах нормальной эксплуатации и при любых аварийных ситуациях;
- малая активность свинца позволяет перейти от корпусной конструкции к бассейновой, отличающейся большой теплоемкостью, что дает возможность разместить оборудование в бетонной шахте, облицованной сталью или чугуном, совместимыми со свинцом (это снижает стоимость реакторной установки (РУ)), и повысить безопасность реактора в переходных и аварийных процессах за счет тепловой инерционности контура;
- в составе РУ отсутствуют материалы, выделяющие водород как при нормальной эксплуатации, так и в аварийных ситуациях;
- химическая инертность свинца при взаимодействии с водой и воздухом исключает возникновение химических взрывов и пожаров при разгерметизации контура;
- обеспечиваемый высокий уровень естественной циркуляции свинца, а также неограниченное время пассивного отвода тепла непосредственно от свинца (ес-

тественной циркуляцией воздуха) в теплообменниках системы охлаждения исключают аварии с перегревом контура при расхолаживании РУ;

- небольшой мощностной эффект за счет высокой теплопроводности нитридного топлива в сочетании с  $KB \cong 1$  обеспечивает возможность работы с малым, соизмеримым с  $\beta_{эфф}$ , запасом реактивности, исключающим разгон реактора на мгновенных нейтронах;

- сочетание свойств плотного теплопроводного нитридного топлива со свинцовым теплоносителем обеспечивает полное воспроизводство делящихся нуклидов, что позволяет работать, как уже отмечалось, в равновесном топливном режиме без уранового blankets с подпиткой лишь отвальным (обедненным) ураном и исключает наработку оружейного плутония;

- наличие газовой полости и системы локализации исключает переопрессовку первого контура;

- использование свинца в качестве теплоносителя позволяет раздвинуть решетку твэлов (без смягчения спектра и ухудшения физических характеристик) почти вдвое по сравнению с БН, снизить скорость теплоносителя, уменьшить гидравлическое сопротивление контура.

Проект СВБР-100 [7] (теплоноситель свинец-висмут) имеет практически все вышеперечисленные преимущества и удовлетворяет принципу внутренней присущей естественной безопасности. Разрабатывается он для решения задач атомной энергетики на региональном уровне. Предполагается, что проект в перспективе позволит регионам достичь энергетической самостоятельности и уменьшит их зависимость от поставок органического топлива. Кроме того, безопасность атомных станций малой мощности приобретает особую значимость, так как атомные станции теплоснабжения располагаются особенно близко к населенным пунктам. Преимущество проекта СВБР-100 состоит в освоении технологии сплава свинец-висмут для транспортных установок (атомные подводные лодки).

### **РЕАКТОРЫ БРЕСТ-ОД-300 И СВБР-100 КАК ХАРАКТЕРНЫЕ ПРЕДСТАВИТЕЛИ РЕАКТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ**

**Реактор БРЕСТ-ОД-300** (рис. 1) разрабатывается как серийный энергетический реактор средней мощности и как опытно-демонстрационный реактор, предназначенный для накопления эксплуатационного опыта, отработки и проверки технических решений, определяющих безопасность и экономичность быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем.

Реактор БРЕСТ-ОД-300 имеет тепловую мощность 700 МВт, электрическую – 300 МВт, КПД нетто энергоблока ~43%. Это двухконтурный парогенерирующий энергоблок (первый контур жидкометаллический, интегрально-петлевой, второй – пароводяной).

В отношении обеспечения безопасности важной является проблема отвода тепла от свинцового контура, поскольку использование в качестве рабочего тела воды-пара связано с высоким давлением в ПГ, расположенном в контуре свинцового теплоносителя, не испытывающего давления. На данной стадии проекта давление в ПГ снижено до ~18 МПа. Снижение давления рабочего тела – это временные трудности, решаемые конструктивно. Ведутся поиск и исследование альтернативных рабочих тел, которые позволят радикально решить проблему снижения давления с сохранением КПД [3].

Циркуляция свинца через активную зону и ПГ осуществляется принудительным протоком свинца под действием насосов, но не за счет непосредственно создаваемого ими напора (как в реакторах типа БН), а за счет организации насосами разницы уровней холодного и горячего теплоносителя (см. соответственно уров-

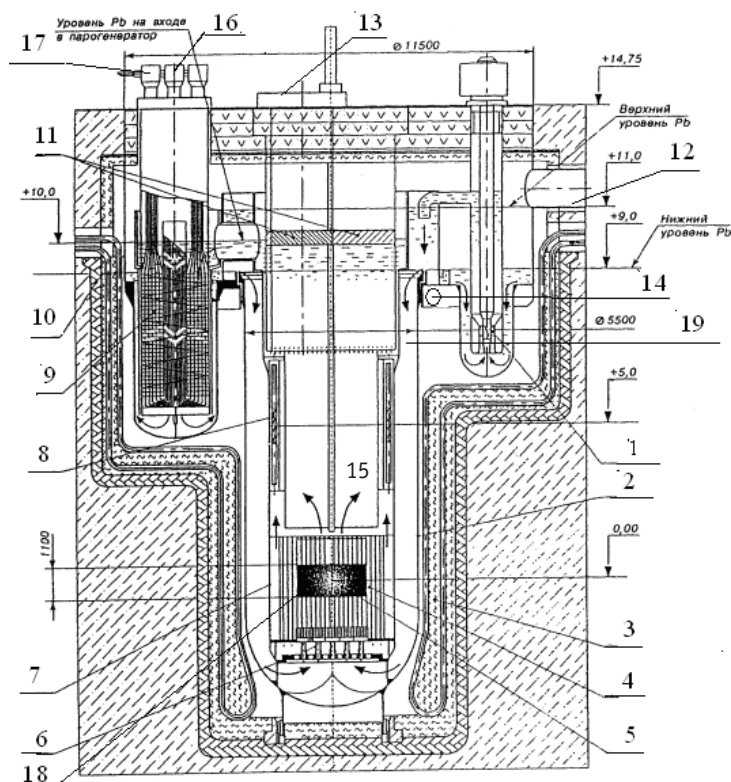


Рис. 1. Общий вид реактора БРЕСТ-ОД-300: 1 – насос; 2 – корпус реактора с опорами; 3 – термозащита; 4 – СУЗ; 5 – активная зона; 6 – опорные стояки; 7 – разделительная обечайка (корзина активной зоны с входными коллекторами); 8 – хранилище ТВС; 9 – парогенератор; 10 – бетонная шахта; 11 – поворотные пробки; 12 – аварийный сброс пара; 13 – перегрузочная шлюзовая машина; 14 – опоры корпуса реактора; 15 – место для центральной колонны; 16 – вход воды в ПГ; 17 – выход пара из ПГ; 18 – отражатель; 19 – тракт теплоносителя в первом контуре

ни +11 и +9 м на рис. 1). Неравномерность расхода свинца через активную зону и ПГ при остановке одного или нескольких насосов исключается; обеспечивается осесимметричность потока теплоносителя на входе в активную зону при любой асимметрии в работе петель, поскольку при сливе теплоносителя из петель на свободный уровень сглаживаются неравномерности в расходах по разным петлям. Обеспечивается также инерция расхода при быстрой остановке насосов за счет выравнивания уровней теплоносителя в напорной и всасывающих камерах (~20 с).

Система циркуляции работает по следующей схеме. Холодный теплоноситель поднимается на высоту 2 м относительно уровня свинца в камере всаса и подается на свободный уровень кольцевой напорной камеры. Далее он опускается между корпусом реактора и разделительной обечайкой к опорной решетке активной зоны, проходит через ТВС снизу вверх, нагревается и подается в общую сливную камеру горячего теплоносителя. Через патрубки раздаточного коллектора теплоноситель перетекает во входные полости ПГ и межтрубное пространство ПГ, в котором опускается, отдавая тепло теплоносителю второго контура, проходящему внутри трубок ПГ. Охлажденный теплоноситель выливается в камеру всаса насосов, отсюда снова подается насосами в напорную камеру.

Приведем некоторые дополнительные сведения о реакторе БРЕСТ-ОД-300.

Температура пара на входе в турбину при полной мощности – 525°C. Температура воды на входе в ПГ – 355°C. Основные размеры активной зоны и бланкетов

при 20°C: эквивалентный диаметр внутренней части активной зоны – 1280 мм, промежуточной – 1990 мм, внешней – 2296 мм, высота активной части – 1100 мм.

Размер ТВС «под ключ» – 175 мм, толщина чехла ТВС – 2,5 мм, длина сборки – 3850 мм. Количество твэлов в сборке – 169 (треугольная упаковка). Используются два типа сборок: центральная и периферийная. В центральной ТВС шаг расположения твэлов  $s/d=1,33$  (внешний диаметр твэлов 9,7 мм), в периферийной – шаг составляет 1,23 (твэлы диаметром 10,5 мм). Дистанционирование осуществляется напаянными на оболочку твэлов спиральными ребрами (касание «ребро по ребру»), продольный шаг навивки которых составляет 150–200 мм и будет уточнен по мере окончательной проработки конструкции.

Температура входа свинцового теплоносителя в ТВС составляет 400 °C, максимальная температура на выходе ТВС – 595°C; максимальная мощность ТВС – 5,86 МВт, характерное значение числа Пекле – 1000.

Толщина оболочки твэлов – 0,5 мм, полная длина твэла – 2150 мм. Зазор между топливом и оболочкой – 0,15 мм (зазор заполняется гелием). Материал оболочек в активной зоне – сталь ЭП-823(12%Cr) с теплопроводностью ~ 25 Вт/(м·°C). Максимально допустимая температура поверхности оболочки 650°C. Топливный сердечник не имеет центрального отверстия.

Число охлаждающих первичных петель – 4, количество теплоносителя по первому контуру 8600 т (с расходом 14400 м<sup>3</sup>/ч). Расход теплоносителя по первому контуру: полный – 41600 кг/с, по петле – 10400 кг/с. Скорость теплоносителя в активной зоне: максимальная – 1,8 м/с, давление в активной зоне – 0,155 МПа. Главные насосы (4 шт.) мощностью 4350 кВт расположены на холодной линии первого контура, производительность – 72×4 м<sup>3</sup>/мин, давление на выходе – 0,225 МПа, число оборотов в минуту – 368 (в номинале).

Система аварийного расхолаживания (САРХ) реактора БРЕСТ-ОД-300 не похожа ни на одну из систем пассивного расхолаживания быстрых реакторов с натриевым охлаждением. Теплоотвод в САРХ осуществляется воздухом за счет естественной тяги в трубах Фильда (диаметр наружной трубы – 210 мм, внутренней – 140 мм, число труб – 260), расположенных в свинце в шахтах ПГ. Атмосферный воздух поступает во внутреннюю трубку трубы Фильда (опускной участок), а поднимается в зазоре между внутренней и наружной трубой (подъемный участок). Нагретый воздух поступает в вытяжную трубу и выбрасывается в атмосферу.

При работе реактора в номинальном режиме САРХ находится в «горячем» резерве и мощность системы в этом случае минимальна. При температуре 420°C мощность САРХ составляет ~11 МВт. Трубы Фильда САРХ могут использоваться и для штатного расхолаживания реактора с принудительной циркуляцией воздуха (вентиляторы). Отводимая мощность системы расхолаживания составляет ~ 1% *N*.

Паропроизводительность – 1488 т/ч. Температура теплоносителя на входе в перегреватель – 540°C, на выходе испарителя – 420°C. Температура воды на входе в испаритель – 355 °C, температура пара на выходе из пароперегревателя – 525 °C. Эффективная площадь испарителя – 852 м<sup>2</sup>. Тепловая мощность испарительного модуля – 175 МВт.

Полная мощность турбины высокого давления – 330 МВт, генератора – 300 МВт, число оборотов – 3000 об/мин, минимальное давление в конденсаторе – 0.00343 МПа.

**Реактор СВБР-100** (рис. 2) – двухконтурный энергетический быстрый реактор с охлаждением эвтектикой свинец-висмут тепловой мощностью 265 МВт, электрической – 80 МВт (первый контур – жидкометаллический интегральный, второй – пароводяной). Топливо – UO<sub>2</sub>, затем PuO<sub>2</sub>-UN [1].



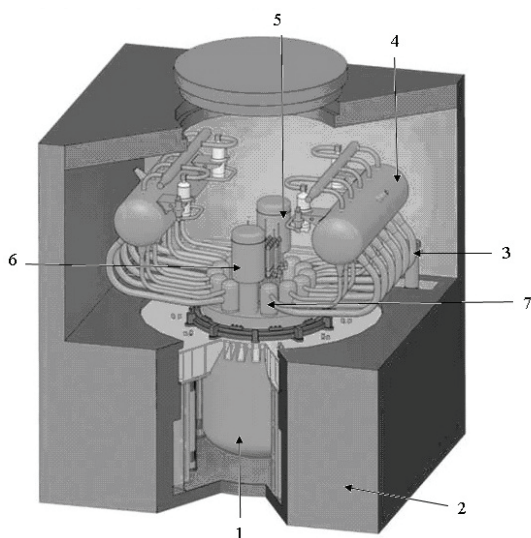


Рис. 2. Реакторный блок СВБР-100: 1 – корпус реактора; 2 – массивная защита; 3 – подводящие трубопроводы; 4 – барабан-сепаратор; 5, 6 – насосы; 7 – блок испарителя (парогенератор)

Шаг винтовых ребер – 750 мм. Твэлы расположены в треугольной решетке с относительным шагом  $s/d=1,13$ . Эквивалентный диаметр активной зоны – 1645 мм, эквивалентный диаметр радиальных бланкетов – 2090 мм; толщина верхнего осевого бланкета над топливными элементами – 300 мм. Максимальная температура поверхности оболочки твэлов – 600°C. Обогащение топлива – 16,1%.

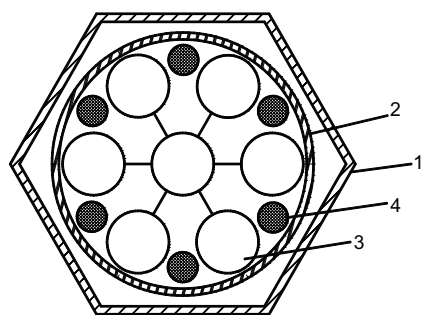


Рис. 3. Вариант системы СУЗ для реактора СВБР-100: 1 – шестиугольная труба; 2 – круглая обечайка; 3 – поглощающий элемент; 4 – цилиндрический вытеснитель

предохранительное устройство, барботажное устройство и трубопроводы. Система специального разогрева МБР перед заполнением его теплоносителем и для поддержания МБР в горячем состоянии включает в себя систему трубопроводов, расположенных между основным и страховочным корпусами МБР, по которым подается греющий пар.

Система безопасности представлена системами аварийной защиты, локализации течей ПГ, автономного расхолаживания и пассивного отвода тепла.

Температура теплоносителя в первом контуре на входе в парогенератор – 435°C, на выходе из парогенератора – 268°C, состояние пара на входе в турбину при полной мощности: температура – 250°C, давление – 4,7 МПа.

Активная зона выполнена бескасетной. Число твэлов в активной зоне – 12144. Твэлы дистанционируются винтовыми четырехзаходными ребрами, выполненными за одно целое с оболочкой, касанием «ребро по ребру». Твэл реактора СВБР-100 выполняется из сплава ЭП-823(12% Cr), его общая длина 2060 мм. Внешний диаметр оболочки 12 мм, внутренний диаметр – 11,2 мм. В оболочке твэла заключены топливные брикеты, которые составляют зону энерговыделения длиной 900 мм. Выше зоны энерговыделения расположена зона воспроизводства. Оболочка имеет четырехзаходные винтовые ребра трапециевидальной формы, выполненными за одно целое с оболочкой и обеспечивающие дистанционирование твэлов при касании их друг с другом «ребро по ребру».

На рисунке 3 показан вариант системы СУЗ быстрых натриевых реакторов, который, вероятно, будет использован в реакторе СВБР-100.

Приведем некоторые дополнительные сведения о реакторе СВБР-100 [6, 8].

Система первого контура включает в себя активную зону, модули ПГ, главные циркуляционные насосы (ГЦН), внутрикорпусную радиационную защиту, расположенную в корпусе моноблока реакторного (МБР). Система второго контура включает в себя модули ПГ, трубопроводы питательной воды и пара, сепараторы и конденсаторы автономного расхолаживания. Система защитного газа включает в себя конденсаторы газовой системы, мембранно-

Средняя продолжительность кампании реактора – 2200 суток. Средняя продолжительность остановки для пополнения топливом (исключая продолжительность периода обслуживания) – 60 дней.

Число охлаждающих первичных петель – 2, количество теплоносителя по первому контуру – 193 т. Расход теплоносителя по первому контуру: полный – 11760 кг/с, по петле – 5880 кг/с. Средняя скорость теплоносителя в активной зоне 2,0 м/с, давление в активной зоне – 0,4 МПа. Главный циркуляционный насос – механический, осевой, погружного типа. Расположен на холодной линии первого контура с производительностью 34,2 м<sup>3</sup>/мин. Давление на выходе 0,55 МПа. Число оборотов в минуту – 750 (при номинальной нагрузке). Электрическая мощность – 420 кВт.

Парообразование происходит в двух объектах испарителя (шесть модулей) из трубок Фильда. Температура теплоносителя на входе испарителя – 435°С, на выходе испарителя – 268°С. Температура воды на входе в испаритель – 260°С при давлении 4,7 МПа. Трубы испарителя – двойные. Внешний диаметр – 26,0 мм, толщина стенки – 1,5 мм. В испарительном модуле – 301 трубка. Эффективная площадь испарения – 93,4 м<sup>2</sup>. Тепловая мощность испарительного модуля – 22,5 МВт.

Система отвода остаточного тепловыделения – естественная конвекция теплоносителя в основных петлях и отвод тепла от объема реактора с помощью радиации и конвекции.

### **ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА БРЕСТ-ОД-300**

Проведен предварительный теплогидравлический расчет активной зоны реактора БРЕСТ-ОД-300 (на основании некоторых упрощений и допущений), который заключался в получении общих параметров активной зоны, скоростей и подогревов в ячейках центральной ТВС, температурных полей твэлов, расположенных в центральной треугольной ячейке и пристенных твэлов, отклонений расчетной температуры оболочки твэлов под действием факторов перегрева, гидравлических характеристик центральной ТВС.

В расчетах учитывалась специфика теплогидравлики работы твэлов различной категории в ТВС (использовались индивидуальные формулы по теплообмену для пристенных и центральных твэлов, повышенное влияние переменного энерговыделения при использовании свинцового теплоносителя на окончательные результаты, нестабилизированность теплогидравлических процессов в пристенной области ТВС и т.п.) [9, 10].

В результате расчета получены некоторые основные характеристики активной зоны.

Объем активной зоны – 3,15 м<sup>3</sup>, ее диаметр – 2,04 м, площадь – 3,25 м<sup>2</sup>. Количество ТВС в активной зоне – 112 шт., в предположении того, что доля объема, занимаемая ячейками органов СУЗ, составляет ~5%. Средняя мощность ТВС – 5,63 МВт.

Максимально допустимая мощность твэла определяется двумя температурами: на внутренней поверхности оболочки и в центре топливного сердечника. В первом случае она составила  $3,64 \cdot 10^4$  Вт, во втором – несколько больше. Мощность твэла, определенная из мощности наиболее напряженной ТВС, –  $4,17 \cdot 10^4$  Вт.

При расчете скоростей и подогревов теплоносителя в ячейках предполагалось, что в ТВС с большим количеством твэлов влиянием угловых ячеек можно пренебречь. Исходя из этого получены скорости свинца в центральных и периферийных ячейках, которые составили 2,76 и 2,65 м/с соответственно, а средняя скорость свинца в наиболее напряженной ТВС – 1,79 м/с. Подогревы теплоносителя в цен-

тральных и периферийных ячейках равны 168,3 и 129,2°C, средний подогрев в активной зоне – 144°C, средний подогрев в наиболее напряженной сборке – 158,4°C.

Результаты расчетов по температурным полям для центральных и периферийных твэлов приведены в табл. 1 ( $H_{a.z.}$  – высота активной зоны). Графические зависимости даны на рис. 4, 5.

Таблица 1

**Температурные поля для центральных и периферийных твэлов**

Центральные твэлы						
Координата по высоте активной зоны	0	$\frac{1}{4}H_{a.z.}$	$\frac{1}{2}H_{a.z.}$	$\frac{5}{8}H_{a.z.}$	$\frac{3}{4}H_{a.z.}$	$H_{a.z.}$
Температура свинца, °C	422	455,7	504,2	529,4	552,7	586,3
Температурный напор «стенка-жидкость», °C	14,4	23,3	26,5	25,1	21,8	11
Температура наружной поверхности оболочки твэла, °C	436,4	479	530,7	554,5	574,5	597,4
Температура внутренней поверхности оболочки твэла, °C	444,6	491,2	550,2	575,4	590,7	604,9
Неравномерность температуры по периметру твэла, °C	1,2	2,3	2,7	2,5	2,2	1,2
Температура наружной поверхности топлива твэла, °C	585,2	745,5	867,9	901,1	861,7	733,2
Температура внутренней поверхности топлива, °C	653,8	898,8	1049	1075,1	1015,2	811,8
Периферийные твэлы						
Температура свинца, °C	422	447,6	484,6	503,8	521,6	547,2
Температурный напор «стенка-жидкость», °C	26,5	39,7	45,8	43,3	37,5	19
Температура наружной поверхности оболочки твэла, °C	448,5	487,3	530,4	547,1	559,1	566,2
Температура внутренней поверхности оболочки твэла, °C	456,7	499,7	544,4	561,2	571,1	574,7
Неравномерность температуры по периметру твэла, °C	3,1	5,9	6,7	6,4	6,4	6,3
Температура наружной поверхности топлива твэла, °C	587,3	757,5	848,6	851,6	829,4	707,1
Температура внутренней поверхности топлива, °C	665,8	910,9	1029,7	1025,6	982,8	785,8

**ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ СВБР-100**

Реактор СВБР-100 ориентирован на максимальное использование результатов теплогидравлических исследований, полученных в теплофизическом отделении



ФЭИ для натриевых быстрых реакторов. Однако этот реактор не менее широко использует технологию транспортных установок, которая была хорошо разработана ранее.

Тепловое моделирование осуществляется по параметру эквивалентной теплопроводности  $\epsilon_k$  твэлов и их имитаторов. Условия моделирования твэлов и стержней СУЗ реакторов транспортных установок, предшествующих реактору СВБР-100, представлены на рис. 6.

Твэл реактора (рис. 6а) моделируется имитатором (трубкой) из стали 20 с медной трубкой, вставленной внутрь имитатора (рис. 6б). Эквивалентные теплопроводности твэла и имитатора рассчитываются в функции  $k$  (номера гармоники разложения температурного поля в ряд Фурье). Численные значения параметров  $\epsilon_k$  для твэла и имитатора отличаются несильно, а при  $k = 6$  (что соответствует бесконечной треугольной решетке твэлов) практически совпадают.

Пэл системы СУЗ, показанный на рис. 6в, моделируется трубкой из стали 20 (система СУЗ рассматривается для транспортных установок – рис. 7). Значения параметра  $\epsilon_k$  при разных  $k$  для пэла и его имитатора показаны на рис. 6. Имитаторы обогреваются изнутри нихромовыми спиралями. На поверхности имитаторов пэ-

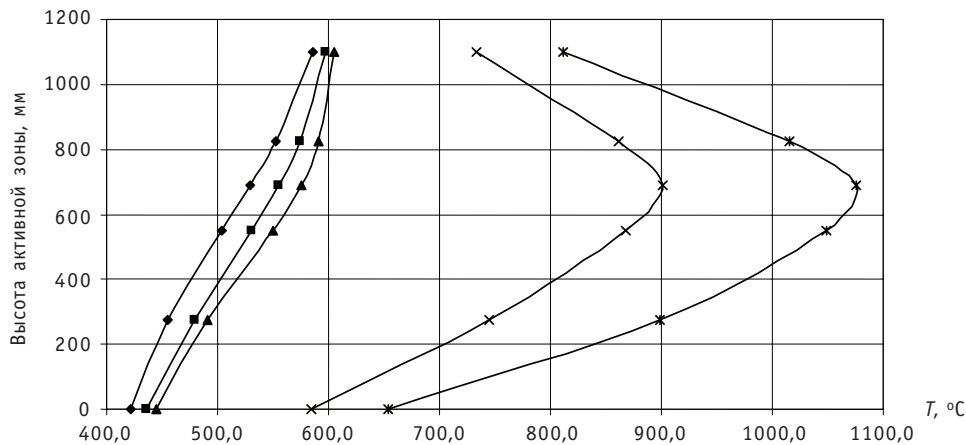


Рис. 4. Температурные поля для центрального твэла:  $\blacklozenge$  – температура теплоносителя;  $\blacksquare$  – температура наружной поверхности оболочки твэла;  $\blacktriangle$  – температура внутренней поверхности оболочки твэла;  $\times$  – температура наружной поверхности топлива;  $*$  – температура внутренней поверхности топлива

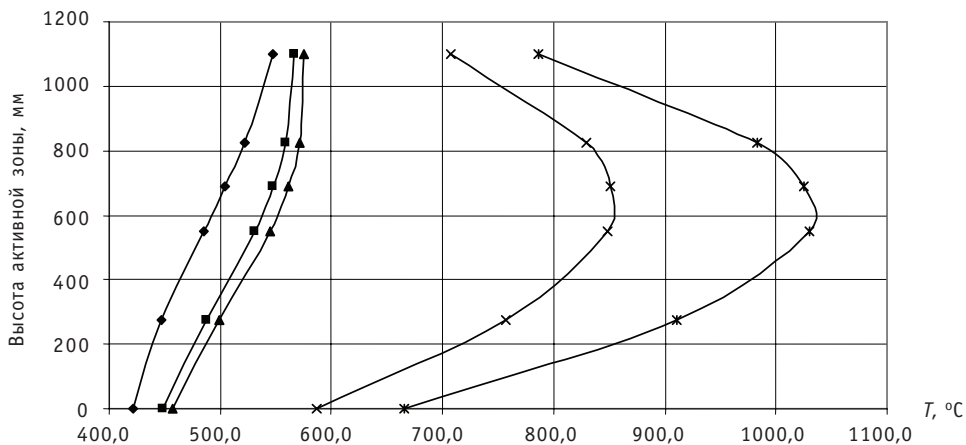


Рис. 5. Температурные поля для периферийного твэла:  $\blacklozenge$  – температура теплоносителя;  $\blacksquare$  – температура наружной поверхности оболочки твэла;  $\blacktriangle$  – температура внутренней поверхности оболочки твэла;  $\times$  – температура наружной поверхности топлива;  $*$  – температура внутренней поверхности топлива

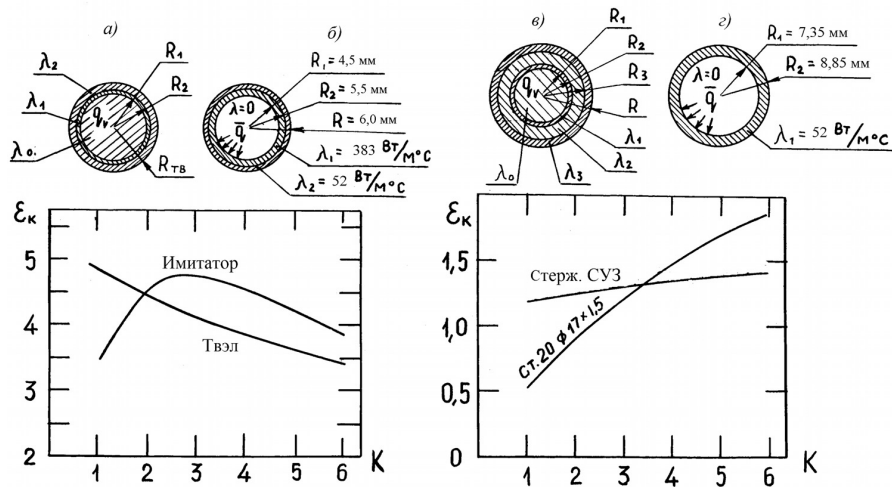


Рис. 6. Схема твэла (а), имитатора (б), стержня канала СУЗ (в), его имитатора (г) и их параметры эквивалентной теплопроводности

лов СУЗ заделаны девять микротермопар в продольных пазах на различных расстояниях по высоте. Поворот имитаторов пэлов в интервале углов 0–360° позволяет замерять распределение температур по их периметру.

Внутри гладкого имитатора твэла заделаны девять микротермопар. На имитатор надевается оправка, выполненная в виде выточенных на станке винтовых четырехзаходных трапецевидных ребер, прилегающих к его стенкам. Имитатор выполнен поворотным, при его вращении измеряются температуры под ребрами.

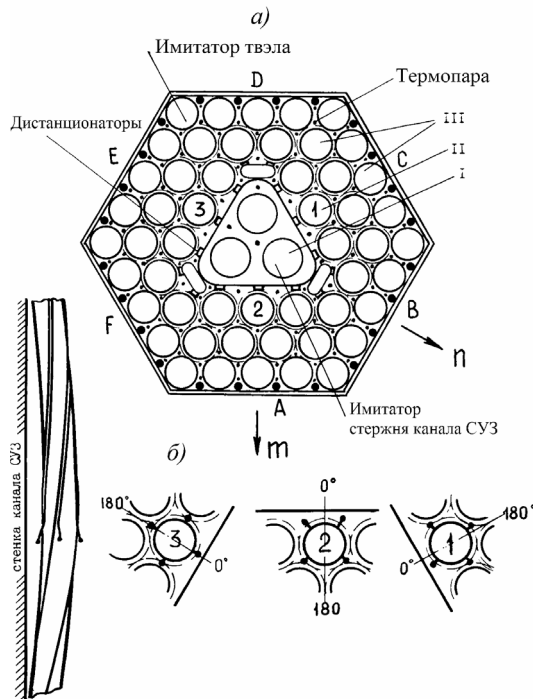


Рис. 7. Сечение экспериментальной модели с указанием термопар и групп нагреваемых имитаторов твэлов и пэлов (а); схема расположения термопар на присузовских имитаторах твэлов в зоне максимального прогиба (б): 1; 2; 3 – имитаторы твэлов; А–F – грани обечайки; m; n – характерные направления в сечении модели; I; II; III – группы энерговыделений

Микротермопарами измеряются также температуры теплоносителя по центрам всех ячеек модельной сборки. В качестве термоэлектродов микротермопар используются хромель и алюмель, защитным чехлом является капилляр диаметром 0,8 мм. Бескапиллярные термопары позволяют выявить поправку на заделку спая микротермопары в защитном чехле. Турбулизаторы-смесители гарантируют среднесмешанную температуру теплоносителя, измеряемую на выходе каждой ячейки.

При конструировании модели используются принципы, изложенные в [11]. На рисунке 7а показано сечение модельной сборки с указанием термопар и групп нагреваемых имитаторов твэлов и пэлов. Модель представляет собой шестигранную обечайку с гранями А–F, внутри которой расположены в треугольной упаковке имитаторы твэлов (с шагом  $s/d = 1,13$ ). В центре сборки находится треугольный канал СУЗ с тремя имитаторами поглощающих стержней (трубки внешним диаметром 17,7 мм, внутренним – 14,7 мм из стали 20). Римскими цифрами на рис. 7 обозначены группы энерговыделений: I (имитаторы пэлов), II и III (имитаторы твэлов). При этом мощность имитаторов твэлов группы II, примыкающей непосредственно к каналу СУЗ, больше или меньше мощности остальных твэлов на 30% (больше, если имитатор СУЗ вытасен из канала – воспроизводится условие отсутствия поглощения нейтронов; меньше, если имитатор СУЗ полностью погружен в канал – воспроизводится условие поглощения нейтронов). Имитаторы твэлов имеют четырехзаходные проволочные навивки, осуществляющие касание «ребро по ребру», за исключением пристенных имитаторов, которые выполнены гладкими. С одной стороны они касаются проволоки соседних имитаторов, с другой – стенку шестигранной обечайки. В пристенных ячейках имеются цилиндрические вытеснители. На стенках канала СУЗ предусмотрены прямоугольные дистанционаторы, касающиеся ребер имитаторов твэлов. На присузовских имитаторах твэлов (1–3) имеются термопары, выходящие своими спаями в теплоноситель в центральной плоскости модели (в зоне максимального прогиба имитаторов), как это показано на рис. 7б. Прогиб в исследованиях задается разным. Термопары измеряют температуру теплоносителя в ячейках в этом сечении. Кроме этого температура теплоносителя измеряется во всех ячейках на выходе пучка, а также на выходе канала СУЗ. Имеются вытеснители в районе углов канала в зоне имитаторов твэлов. Имитаторы пэлов СУЗ имеют небольшой обогрев, соответствующий энерговыделению в пэлах при поглощении нейтронов материалом В<sub>4</sub>С.

На рисунке 8а показана схема расположения дистанционаторов и нумерация ячеек

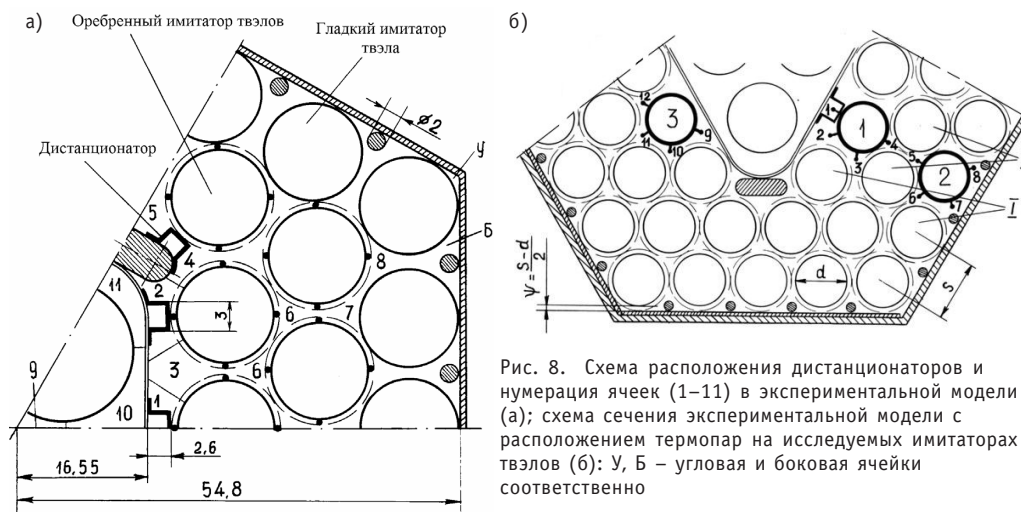


Рис. 8. Схема расположения дистанционаторов и нумерация ячеек (1–11) в экспериментальной модели (а); схема сечения экспериментальной модели с расположением термопар на исследуемых имитаторах твэлов (б): У, Б – угловая и боковая ячейки соответственно

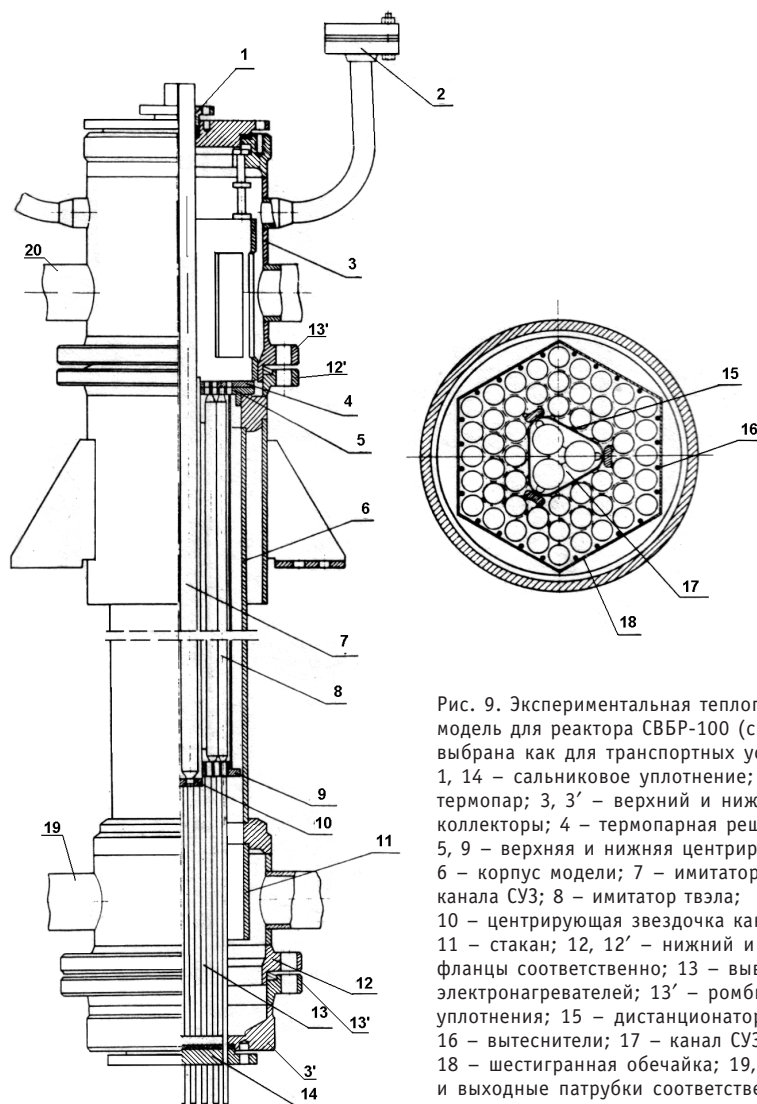


Рис. 9. Экспериментальная теплогидравлическая модель для реактора СВБР-100 (система СУЗ выбрана как для транспортных установок): 1, 14 – сальниковое уплотнение; 2 – вывод терморпар; 3, 3' – верхний и нижний коллекторы; 4 – терморпарная решетка; 5, 9 – верхняя и нижняя центрирующие решетки; 6 – корпус модели; 7 – имитатор стержня канала СУЗ; 8 – имитатор твэла; 10 – центрирующая звездочка канала СУЗ; 11 – стакан; 12, 12' – нижний и верхний фланцы соответственно; 13 – выводы электронагревателей; 13' – ромбические уплотнения; 15 – дистанционаторы; 16 – вытеснители; 17 – канал СУЗ; 18 – шестигранная обечайка; 19, 20 – входные и выходные патрубки соответственно

ек (1–11) в экспериментальной модели. Дистанционаторы представляют собой прямоугольники (со стороной 3 мм), выполненные из изогнутых пластинок, приваренных к вытеснителю или к каналу СУЗ. Дистанционатор «отжимает» оребренный имитатор твэла до его касания либо гладких пристенных имитаторов, либо соседних оребренных имитаторов. При этом осуществляются необходимые прогибы имитаторов, примыкающих к каналу СУЗ. На рисунке 8б иллюстрируется разновидность модельной сборки с расположением терморпар на исследуемых имитаторах твэлов, когда имитатор 3 находится в номинальном геометрическом положении, а имитатор 1 отжат до касания с оребренными соседними имитаторами.

На рисунке 9 показан общий вид экспериментальной модели. Канал СУЗ с имитаторами пэлов СУЗ и имитаторами твэлов, размещенными в шестигранной обечайке, опираются на нижнюю и верхнюю центрирующие решетки. Обечайка с центрирующими решетками размещена в корпусе, выполненном в виде трубы. К корпусу приварены нижний и верхний фланцы, к которым подсоединены через ромбические уплотнения верхний и нижний коллекторы. В сальниковых уплотнениях

и с помощью нажимных фланцев уплотняются соответственно имитаторы пэлов, выполняемые поворотными, и трубочки выводов электронагревателей имитаторов твэлов. На стенках канала СУЗ приварены дистанционаторы, в пристенных ячейках, прилежащих к шестигранной обечайке, расположены цилиндрические вытеснители. Термопарная решетка наложена на верхнюю центрирующую решетку и служит для крепления термодпар, измеряющих температуры теплоносителя на выходе ячеек канала СУЗ и пучка имитаторов твэлов. Эти термодпары выводятся через патрубки верхнего коллектора с резиновым уплотнением. Центрирование канала СУЗ в системе осуществляется специальным устройством – звездочкой. Вход теплоносителя происходит через нижние входные патрубки, а выход – через верхние выходные патрубки, стакан предназначен для равномерного распределения теплоносителя по радиусу модели.

Планируется проведение экспериментальных теплогидравлических исследований для реакторов БРЕСТ-ОД-300 и СВБР-100 согласно вышеприведенным сведениям.

**Работа проводится в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.**

### **Литература**

1. Орлов В.В. Новый этап ядерной энергетики и быстрые реакторы, охлаждаемые свинцом // Информационный бюллетень. Ядерное общество СССР. – 1991. – № 3 (10). – С. 6.
2. Orlov V. V. Evolution of the Technical Concept of Fast Reactors. The Concept of BREST/Proceedings of Internat. seminar «Cost Competitive, Proliferation Resistant, Inherently and Ecologically Safe Fast Reactor and Fuel Cycle for Large Scale Power». – М: Ministry of Russian Federation for Atomic Energy, 2000. –Р. 25-31.
3. Лемехов В.В., Лопаткина А.В., Орлов В.В. и др. Ключевые особенности, задачи и параметры реакторной установки со свинцовым теплоносителем/Доклад на межотраслевом семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» (Теплофизика-2010): Тезисы докладов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2010. – С.11.
4. Кузина Ю.А. Теплогидравлическое моделирование в обоснование активных зон реакторов типа БРЕСТ: дисс. к.т.н., ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2003.
5. Лемехов В.В., Смирнов В.С., Пикалов А.А. и др. Конструктивные и компоновочные решения РУ БРЕСТ-ОД-300/Доклад на межотраслевом семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» (Теплофизика-2010): Тезисы докладов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2010. – С.14.
6. Proceedings of International Atomic Energy Agency. -Vienna: IAEA, July 2006. – №. 21.
7. Тошинский Г.И., Комлев О.Г., Русанов А.Е. и др. Реакторная технология СВБР для региональной энергетики/Доклад на межотраслевом семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» (Теплофизика-2010): Тезисы докладов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2010. – С.16.
8. Леончук М.П., Пыльченков Э.Х., Сивак З.В. Проблемы расчета теплогидравлических характеристик реакторов, охлаждаемых жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут/Доклад на международной конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях»: Сборник докладов. – Обнинск: ФЭИ, 1999. – Т. 2 – С. 650-657.
9. Жуков А.В., Сорокина А.П., Кириллов П.Л. и др. Методические рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов/Под редакцией А.В. Жукова, А.П. Сорокина. – ГКИАЭ, РТМ 1604.008-88, 1988, ФЭИ, 435 с.
10. Жуков А.В. Теплогидравлический расчет реакторов. Часть 5. Переменное энерговыделение в теплогидравлике реакторов. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2009. – 177 с.
11. Жуков А.В., Сорокин А.П., Свириденко Е.Я., Худаско В.В. Экспериментальное и расчетное моделирование теплогидравлики теплообменных аппаратов ЯЭУ. Модельные сборки, датчики, методики. Жидкометаллический стенд: Учебное пособие для слушателей курсов повышения квалификации и спец. факультета. – Обнинск: ОИАТЭ, 1992.

Поступила в редакцию 17.05.2011



**УДК 621.039.51**

*Calculation Analysis of Maximal Design Leaks in Primary Circuit of VVR-c Reactor (IBB.10M) after Design Modernization* \V.V. Sergeev, O.Uy. Kochnov, A. A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 10 pages, 3 tables, 8 illustrations. – References, 3 titles.

Design modernization of the research reactor VVR-C is directed on essential increase of reactor safety, including operation mode during maximal design accidents. The most significant modernization of design from thermal hydraulic point of view are: installation of hydraulic lock on the drain pipeline directly to tank of reactor facility in combination with the top position into the tank the inlet pipeline of the coolant in core. Calculations were performed based on TRAC code. International thermal hydraulic network code TRAC was designed for the safety analysis of water-cooled NPP. Nodalisation scheme of the primary circuit was verified based on existing experimental data from transient mode obtained before modernization of facility. Then consequences of design modernization for a wide range of postulated initial events recommended for SAR were investigated. Calculations of shut down cooling dynamics for reactor facility at natural circulation mode at leaks in the primary circuit, resulting in presented below the fast level decreasing of a coolant into the reactor tank.

**УДК 621.039**

*On the Status of Nuclear Power Engineering as a Science* \V.A. Kanke; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages. – References, 3 titles.

Nuclear power engineering is seen as a pragmatic science concepts which are values. Criticized the interpretation of the status of nuclear power engineering from the standpoint of physicalism and ideas about applied science.

**УДК 621.039**

*Comparative Estimation of Radiation Dose for Aquatic Biota from Radiation Accidents in the Area of Fukushima and Chernobyl NPP* \I.I. Kryshev, A.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 25 titles.

Estimates of radiation doses are presented for marine biota in March-May 2011 in the coastal zone near Fukushima NPP and in the open sea. For most radiosensitive marine organisms (fish and mollusks) the radiation doses did not exceed the reference safe level of 10 mGy/day. At the distance 30 km from the NPP in the open sea the radiation doses for marine biota were much lower than those in the coastal zone near the NPP. Comparative estimates were obtained for radiation doses in marine organisms in the exclusion zones of Chernobyl NPP and Fukushima NPP.

**УДК 661.879: 541.183**

*Extraction of Radionuclides from the Water with New High Temperature Resistant Aluminosilicate Adsorbents* \A.S. Shilina, V.K. Milinchuk, O.A. Ananieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 13 titles.

A simple environmentally friendly low-cost method for the synthesis of aluminosilicate adsorbents, occurring in one-stage process Determined by its static sorption capacity (mg/g) with respect to the cations  $Fe^{3+} - 582 \pm 30$ ,  $Ni^{2+} - 120 \pm 20$ ,  $Pb^{2+} - 240 \pm 20$ ,  $Cu^{2+} - 160 \pm 20$ ,  $Sr^{2+} - 226 \pm 11$ ,  $Cs^{+} - 2350 \pm 117$ . Established that the sorption capacity of the adsorbent increases 2-3 times after the heat treatment. Aluminosilicate adsorbents have a high thermal, chemical and radiation stability.

**УДК 621.039.534**

*Reactors with Heavy Liquid-Metal Coolants and Some Thermohydraulic Data for them* \A.V. Zukov, J.A. Kuzina, V.I. Blozerov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 1 table, 9 illustrations. – References, 11 titles.

The problem of inherent advanced safety of reactors with heavy liquid-metal coolants is considered

in the paper by example of the projects of BREST-OD-300 and SVBR-100 reactors. Key specifications of these reactors are given. Results of preliminary thermohydraulic calculation of a central fuel assembly of the BREST-OD-300 core (triangular lattice of fuel elements) are demonstrated. Also the design of a thermohydraulic model for planned experimental research of the SVBR-100 core is in detail described.

**УДК 621.039.51: 536.24**

*Statistical Estimation of Maximum Fuel-Element Cladding Temperature in Supercritical Water-Cooled Fast Reactor* \K.V. Kartashov, G.P. Bogoslovskaya; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 9 titles.

The analysis of programs subchannel, currently used to estimate the parameters of fuel assemblies of a new generation of reactors cooled by supercritical water. The possibility of the use of programs subchannel at the stage of preliminary calculations, the definition and optimization of design and operational parameters. A comparison of programs, shows the benefits of the program MIF, previously developed to calculate the thermal hydraulic parameters of fast reactors with liquid metal coolant. Shows how to estimate the maximum temperature of fuel cladding of the reactor, taking into account factors of overheating. The possibility of evaluation hot spot factors on the basis of the Monte-Carlo method.

**УДК 621.039.531**

*Radiation-Induced Structural Effects Observing in VVER-1000 RPV Steels under Operation, Recovery Annealing and Accelerated Re-Irradiation* \B.A. Gurovich, E.A. Kuleshova, O.O. Zabusov, S.V. Fedotova, K.E. Prikhodko, A.S. Frolov, D.A. Maltsev, M.A. Saltykov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 4 tables, 7 illustrations. – References, 12 titles.

In this paper evolution of radiation-induced structure elements and level of grain-boundary segregation in VVER-1000 welds during operation, recovery annealing and accelerated re-irradiation were studied using high-resolution methods of transmission and scanning electron microscopy and Auger electron spectroscopy.

The level of grain-boundary segregations in various states was established as well as the fast neutron fluence and flux dependence of the density of radiation defects and radiation-induced precipitates. It is shown that the radiation-induced structure effects correlate with the results of mechanical tests.