

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА ДОПЛЕРОВСКОЙ ПОСТОЯННОЙ НА ОБОСНОВАНИЕ САМОЗАЩИЩЕННОСТИ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

А.В. Данилычев, Д.Г. Елистратов, В.Ю. Стогов, А.В. Тихомиров, В.А. Черный

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им.А.И.Лейпунского, г. Обнинск



В работе представлено влияние точности расчета доплеровской постоянной на обоснование безопасности быстрых реакторов. Обсуждаются погрешность, наблюдаемая в расчетах по различным российским версиям констант БНАБ и диффузионным кодам ($\pm 3\%$), а также предельные возможные погрешности. Надежность отечественного расчетного аппарата для получаемых значений обосновывается сопоставлением с экспериментом на реакторе SEFOR.

ВВЕДЕНИЕ

На степень самозащищенности быстрого реактора влияют как выбор основных теплотехнических параметров (в том числе через температуру топлива), так и имеющийся баланс компонент реактивности. Для описания динамики аварийных процессов значения температурных коэффициентов реактивности (ТКР) и их достаточно подробные пространственные распределения служат исходными данными. В этом качестве точность расчета ТКР_i для описания переходных процессов становится принципиальным моментом. Итоговое поведение реактора в аварийной ситуации определяется соотношением компонент реактивности, связанных с температурой теплоносителя (натриевая плотностная и компонента от радиального теплового расширения активной зоны) и с температурой топлива, в основном, с доплеровской компонентой ТКР_D . Последняя компонента составляет $\sim 90\%$ в суммарном ТКР для большого реактора (см.табл.1) и при максимальном вкладе в реактивность обратной связи вносит основной вклад в поведение реактора при аварии (рис.1).

Одновременно при усовершенствовании расчетных кодов и библиотек ядерных данных возникает необходимость в регулярной ревизии получаемых величин и их пространственных распределений. Подобная ревизия нужна для достижения приемлемой точности регулярно используемого в практических расчетах диффузионного приближения. Ожидаемые вариации расчетных значений, по крайней мере для интегральных величин, невелики [3,4]; тем не менее их влияние на описание аварийных процессов может быть существенным. Так, в [3] продемонстрировано, что для БН с натриевой полостью точность диффузионного приближения оказыва-

Таблица 1

Компоненты реактивности обратной связи, $10^{-5}\Delta K/K)/\text{град}$ [1]

Компоненты реактивности	БН-600		БН-800 ^{*)}	БН-1200 ^{*)}	
	(UO ₂)	(PuU)O ₂ ^{*)}	(Pu-U)O ₂	(Pu-U)N ₁₅	(PuU)N ₁₄
Зависящие от температуры теплоносителя:					
-натриевая плотностная	-0.12	-0.21	-0.01	0.312	0.144
-радиальное расширение	-0.75	-1.07	-0.94	-0.78	-0.73
-расширение штанг СУЗ	-0.12	-0.13	-0.14	-0.13	-0.13
температуры топлива:					
-доплеровская	-1.59	-1.07	-1.34	-1.09	-0.87
-аксиальное расширение	-0.13	-0.16	-0.23	-0.035	-0.043
Суммарный ТКР	-2.59	-2.6	-2.52	-1.723	-1.629
Температурный эффект, % $\Delta K/K$	-0.35	-0.35	-0.32	-0.33	-0.31
МКР, $10^{-6}(\Delta K/K)/\text{МВт}$	-5.58	-4.4	-3.90	-1.315	-1.30
Мощностной эффект, % $\Delta K/K$	-0.82	-0.65	-0.82	-0.45	-0.43

Примечание. *) Активные зоны с натриевой полостью над активной зоной [2]

ется недостаточной на границе раздела активная зона/натриевая полость. Применение транспортного (S_8) приближения приводит к изменениям в пространственных распределениях компонент ТКР_i.

Их интегральные значения ведут себя следующим образом: доплеровская постоянная практически не изменяется; положительность натриевой плотностной компоненты уменьшается на ~15%; компонента аксиального расширения топливного столба увеличивается на ~6%; компонента радиального расширения увеличивается очень незначительно (<2%). Максимальное изменение указанных компонент происходит в периферийной области активной зоны и в натриевой полости, где прирост значений температуры в аварийном процессе максимален. Использование другой записи формул теории подобия может привести к увеличению компонент аксиального и радиального расширения вплоть до 20-30% и 10-15% соответственно [5].

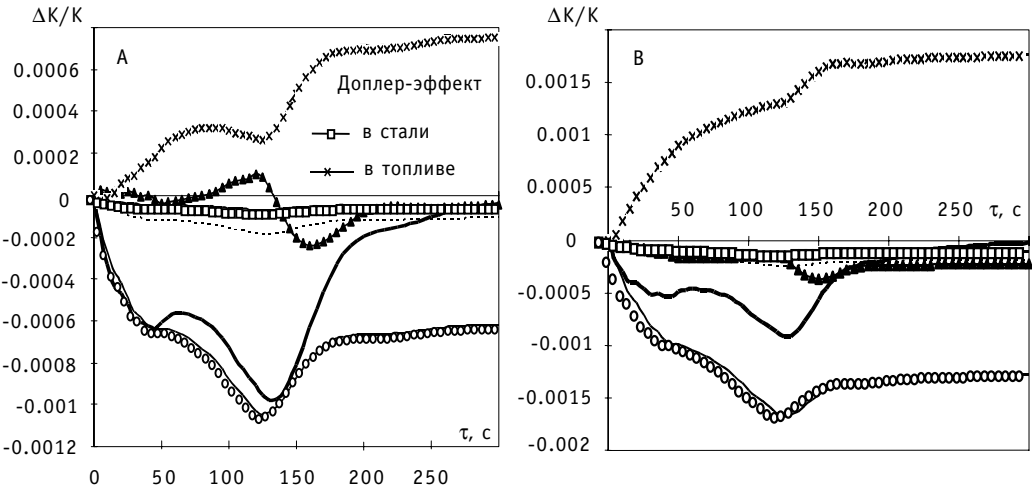


Рис.1. Баланс компонент реактивности в аварии ULOF для оксидного (А) и нитридного (В) вариантов загрузки в реакторе типа БН-1300: \blacktriangle - суммарная реактивность; \circ - реактивность от радиального расширения; — - натриевая плотностная компонента; --- - аксиальное расширение

При ключевой роли TKP_i в обосновании безопасности требования к точности их расчета в полном объеме не определены. Неопределенность в диапазонах допустимой точности затрудняет унификацию расчетных кодов и выработку рекомендаций по их использованию при лицензировании реактора. Ниже приводится определение расчетных диапазонов величин TKP_D в области достоверности их предсказания при использовании различных расчетных кодов и методов. Анализируется влияние погрешности расчета этой компоненты ТКР на описание переходных и аварийных процессов.

РАСЧЕТНАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ КОМПОНЕНТЫ TKP_D

Оценки доплеровской постоянной $T(\partial K / \partial T)$, выполненные по различным российским версиям констант БНАБ и различным расчетным диффузионным кодам для реактора БН-600 включая гибридную его компоновку (при гетерогенно расположенных областях традиционного оксидного и МОХ-топлива), не обнаружили расхождений, больше чем на 3%, в интегральной величине $T(\partial K / \partial T)$ для различных топливных зон (см. рис.2). Здесь не идет речь об изменении пространственного распределения $T(\partial K / \partial T)$, например, аксиального ее распределения при возмущении реактора по температуре и/или составу.

В то же время расчеты, выполненные в рамках международного тестирования для обоснования безопасности реактора типа БН-800 с натриевой полостью [4], продемонстрировали (табл.2.) возможные вариации величины доплеровской постоянной $T(\partial K / \partial T)$ в зависимости от задаваемой точности расчета, его метода и принимаемой системы ядерных данных в интервале температур, соответствующих основным стадиям аварийного процесса (1500-2100°K). Эти вариации лежат в диапазоне ~20%.

Проведенный учет поправок на недиффузионность модели реактора с натриевой полостью, выполненный в рамках единой константной версии [3], продемонстрировал возможный разброс интегральных значений $T(\partial K / \partial T)$ не более 6%, а ее пространственных значений $\leq 10\%$. Максимальные расхождения соответствуют достаточно узкому (<20 см) слою верхней части активной зоны под натриевой полостью, вклад которой в общее значение $T(\partial K / \partial T)$ не превышает 10% (табл.3). Расчетное изменение групповых спектров потока и ценности при переходе к возмущенному (по температуре и плотности натрия) состоянию демонстрируют достаточно слабую их деформацию в области энер-

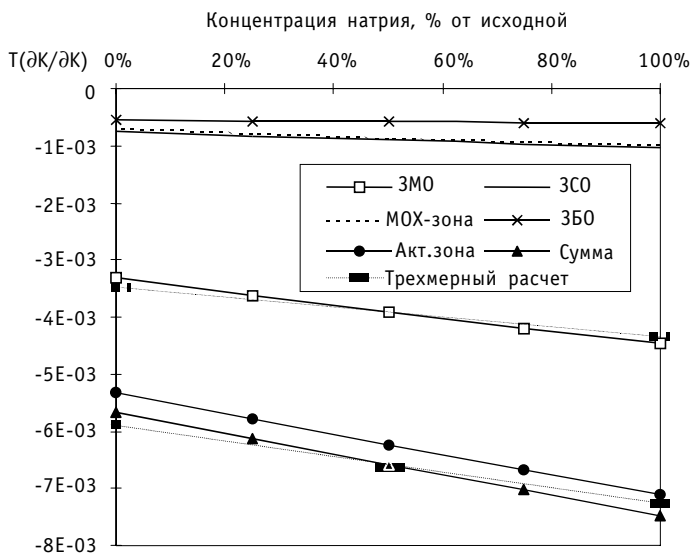


Рис.2. Изменение доплеровской постоянной различных физических зон (для интервала температур 900-2100K) при уменьшении концентрации натрия в активной зоне

Таблица 2

Доплеровская постоянная $T(\partial K/\partial K) \cdot 10^{-2}$ в интервале температур 1500-2100К в реакторе БН-800 (экспертная оценка [1])

Невозмущенное состояние активной зоны					
Зона реактора	Российские оценки ФЭИ (диффузионный расчет)			ЕНЕА ^{**) (ITALY)}	ЕРЛ ^{**) (HITACHI)}
	CAFR ^{*)}	RHEIN ^{*)}	RHEIN ^{**)}	MCNP	MCNP
ЗМО	-0.406	-0.471	-0.462	-0.3746	-0.340
ЗСО	-0.176	-0.147	-0.169	-0.1916	-0.172
ЗБО	-0.092	-0.0843	-0.0890	-0.0767	-0.0965
Вся активная зона	-0.685	-0.683	-0.720	-	-
Нижний ТЭ	-0.075	-0.0906	-0.0852	-0.0860	-0.0761
Боковой экран	-0.052	-0.058	-0.483	-0.0515	-0.0424
Удаление 100% Na из активной зоны					
ЗМО		-0.245	-0.239	-0.257	-0.222
ЗСО		-0.0960	-0.0952	-0.137	-0.0959
ЗБО		-0.0572	-0.0520	-0.0767	-0.0507
Вся активная зона	-0.396	-0.398	-0.338	-	-
Нижний ТЭ		-0.0605		-0.0688	-0.0724
Боковой экран		-0.039		-0.0441	-0.0353

Примечание. *) Расчеты выполнены по теории возмущений; **) прямые расчеты на K_{eff} . (Код MCNP основан на методе Монте-Карло).

гий, характерных для доплер-эффекта (рис.3).

Сопоставление отечественных и зарубежных расчетов доплер-эффекта (табл.2) демонстрирует различия, которые определяются используемой константной версией и ее реализацией в требуемой области энергий нейтронов в расчетном коде MCNP. Даже при значительном увеличении точности результаты, полученные по MCNP, отличаются от величин, полученных по другим программам (табл.4).

Влияние возможной неточности расчета $T(\partial K/\partial T)$ на поведение реактора в аварии ULOF продемонстрировано на рис.4.

Видно, что вариации интегральной величины $T(\partial K/\partial T)$ в указанном диапазоне 20% могут приводить к изменениям расчетной температуры натрия примерно на $\pm 30^{\circ}\text{C}$ для оксидного и на $\pm 20^{\circ}\text{C}$ для нитридного типов топлива. Если предполо-

Таблица 3

Доплеровская постоянная $T(\partial K/\partial K)$ в зависимости от количества натрия, 10^{-2}

Возмущение	Прямой расчет		Теория возмущений
	TWODANT	CAFR	CAFR
Верхний слой 11 см активной зоны: исходный Na удалено 10% Na	0.0696 0.0743	0.6845 0.0661	0.0696 0.0670
Верхний слой 16.5 активной зоны: исходный Na удалено 10% Na	0.1145 0.1003	0.1098 0.1215	0.111 0.119
Верхний слой 22 см активной зоны исходный Na		0.1499	0.1475

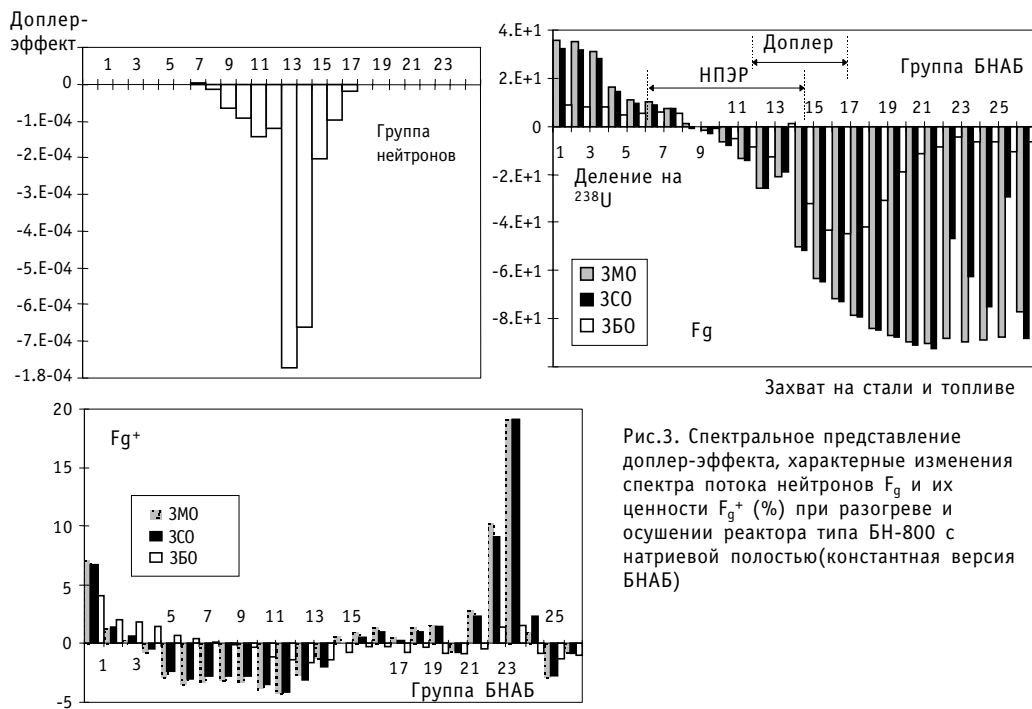


Рис.3. Спектральное представление доплер-эффекта, характерные изменения спектра потока нейтронов F_g и их ценности F_{g+} (%) при разогреве и осушении реактора типа БН-800 с натриевой полостью (константная версия БНАБ)

жить, что показанная на рис.3 зависимость сохраняется при переносе на рассматриваемую зону, ожидаемый разброс максимальных температур натрия в аварии ULOF за счет неопределенности $T(\partial K / \partial T)$, получаемой в отечественных диффузионных программах, не будет превосходить $\sim 10^\circ$.

Ввиду значительности вклада в ТКР доплер-эффекта выявление истинного диапазона возможной погрешности его расчетных значений весьма важно для обоснования самозащитности большого быстрого реактора. Верификация используемых констант для расчета доплер-эффекта проводилась для версии БНАБ-70 при обсчете эксперимента на реакторе SEFOR [6]. Продемонстрировано, что точность диффузионных расчетов вполне приемлема для оценки величины TKR_D с достаточно сильными возмущениями по составу и температуре. Тестирование используемых отечественных кодов и констант на реакторе SEFOR убедительно подтвердило надежность отечественного расчетного аппарата (рис.5) и возможность получения ощутимой погрешности при использовании системы ядерных данных, заложенных в регулярно используемый за рубежом код MCNP. Последнее требует тщательную специализированную подготовку констант для доплеровской области энергий в коде MCNP.

Таблица 4

Влияние увеличения точности расчета в программе MCNP на величину доплер-эффекта (реактор типа БН-800 [2])

Интервал температур	Реактивность, %ΔK/K		
	Диффузионное приближение	Транспортное приближение (S8)	Monte-Carlo ^{c)} (MCNP)
1500 - 2100K	-0.6974 (точность по $K_{eff}=0.5$)	-0.6968 (точность по $K_{eff}=0.1$)	-0.632662±0.0534 ^{a)} -0.635057±0.0417 ^{b)} -0.654331±0.0381 ^{c)}

Примечание. а) $1 \cdot 10^6$ историй; б) $2 \cdot 10^6$ историй; в) $\sim 3 \cdot 10^6$ историй

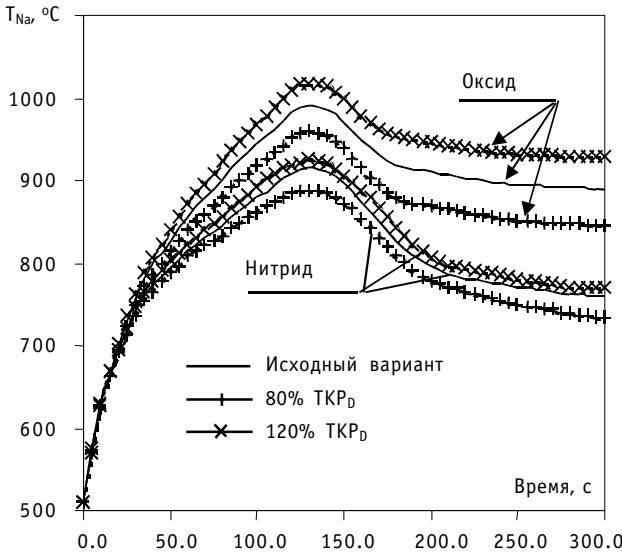


Рис. 4. Изменение максимальной температуры натрия в аварии ULOF при вариациях на $\pm 20\%$ интегральных значений доплеровской компоненты ТКР (большой быстрый реактор 1300 МВт(э))

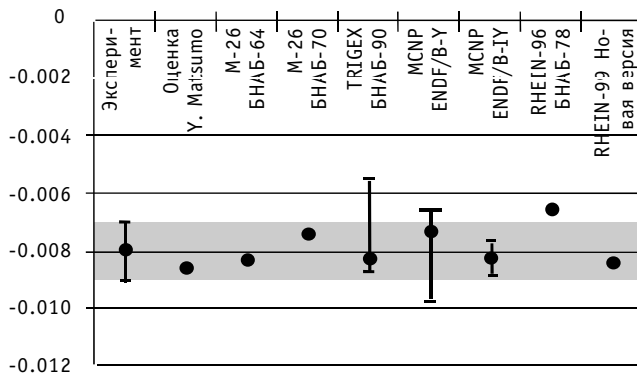


Рис. 5. Расчетные значения доплеровской постоянной в реакторе SEFOR, полученные по различным константным версиям и расчетным кодам, применяемым в практике инженерного проектирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Тестирование используемых отечественных кодов и констант на примере эксперимента на реакторе SEFOR убедительно подтвердило надежность отечественного расчетного аппарата при расчете доплеровской постоянной.

2. Проведенные исследования показывают приемлемую ($\sim 3\%$) точность диффузионного приближения при расчете доплеровской компоненты реактивности обратной связи в БН, по крайней мере, традиционной компоновки. В реакторах, имеющих резко отличающиеся по своим нейтронно-физическим свойствам зоны, например, при наличии натриевой полости, точность расчета снижается, оставаясь в разумных пределах ($\sim 6\%$). Несмотря на это требования к точности расчета ТКР_D на границе раздела активная зона - натриевая полость ужесточаются (погрешность может доходить до 10%).

3. Переход к более высоким, чем диффузионное, приближениям приводит к

изменениям в интегральных компонентах ТКР. Доплеровская постоянная при этом практически не изменяется (не более 6% при расчете в транспортном S_8 приближении).

4. Возможный диапазон максимальных оценок ТКР_D с учетом пространственного распределения данной компоненты вносит изменения в итоговую температуру натрия на примере аварии ULOF на уровне: при наличии натриевой полости - 10-15°C; в традиционной компоновке - 3-5°C

Используемые в настоящее время диффузионные методы расчета ТКР_D в рассматриваемых активных зонах типичных БН дают консервативные оценки.

Литература

1. Букиа Ю.К., Данилычев А.В., Елисеев В.А. и др. Физические основы принципа максимальной самозащищенности и их реализация в перспективных активных зонах реакторов на быстрых нейтронах: Докл. на конф. УкрЯО по программе TESIS «Безопасность и защита АЭС» (Одесса, 1997).
2. Evaluation of benchmark calculations on a Fast Power Reactor Core with near zero sodium void effect/IAEA-TECDOC-731. - Vienna, 1994.
3. Грабежной В.А., Данилычев А.В., Елистратов Д.Г. и др. Эффекты кинетичности при расчете коэффициентов реактивности в большом быстром реакторе с натриевой полостью//Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. – 1996. - Вып.2. - С. 111-125.
4. Work of IAEA/CEC Comparative Calculations for a Severe Accident (ULOF) in the BN-800/1500 MW Reactor with Zero Void Effect. - Contract CEC/IAEA B7-6340/95/191/C2.
5. Абрамов Б.Д. О связи эффектов реактивности в кинетической и диффузионной теориях возмущений. // Атомная энергия. – 1998. - Т.84. - Вып.2. - С.98-102.
6. Пшакин Г.М. Анализ экспериментов по измерению Доплер-эффекта в реакторе SEFOR // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. – 1976. - Вып.21.

Поступила в редакцию 24.03.2000

A.V. Danilytshev, D.G. Elistratov, I.A. Kuznetsov, V.Yu. Stogov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 5 illustrations, 3 tables. – References, 10 titles.

The role of reactivity coefficients determining the feedback on the channel «temperature-reactivity» in the unprotected accidents of fast reactors is discussed. For the reactor cores with different capacity, configuration and structure the potential opportunities of BN-type reactors in UTOP and ULOF accidents are demonstrated. It is shown that traditional oxide fuel has exhausted its opportunities for creation of perspective cores with the maximal self-protection.

УДК 621.039.526

Influence of Calculation Accuracy of TCR Doppler Components on Substantiation of Fast Reactor Safety \ A.V. Danilytshev, V.Yu. Stogov, A.V. Tichomirov, V.A. Cherny; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 5 illustrations, 4 tables. – References, 6 titles.

The influence of discrepancy of Doppler constant on a substantiation of safety of fast reactors is submitted in the paper. The error observed in calculations with various Russian versions of ABBN data set and diffusion codes ($\pm 3\%$), as well as the maximum probable errors are discussed. Reliability of the domestic calculation instrument for obtained values is proved by comparison with the experiment on the SEFOR reactor.

УДК 621.039.526

Calculation-Optimization Investigations of Safety Characteristics of High Power Fast Reactors Cooled by Heavy Metals and their Alloys \ V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.

The possibilities of achievement of inherent self-protection of high power LMFRs cooled by lead, bismuth and their alloys are examined. The different variants of layout of the core self-protection are presented. Behavior of the LMFR in the most dangerous ATWS is analyzed.

УДК 621.039.536

Influence of Impurities of Silver, Tin and Antimony on Oxidation Potential of the Lead-Bismuth Coolant \ B.A. Shmatko, A.E. Rusanov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

Thermodynamics of interaction of metal impurities Ag, Sn and Sb with oxygen in an eutectic alloy lead-bismuth at temperature 500°C is investigated experimentally. Dependence of the melt Gibbs energy of concentration of each of impurities is defined by the electromotive force method.

УДК 621.039.6:539.17

Transmutation of Fission-Fragment Palladium in Blanket of Fusion Facility with Resonance Neutron Spectrum \ A.E. Sintsov, V.A. Apse, A.N. Shmelev, M. Saito, V.A. Artisiyk; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 11 pages, 5 illustrations, 8 tables. – References, 9 titles.

Transmutation of a radioactive fission product - palladium without preliminary radioactivity partitioning is considered. The fission-fragment palladium transmutation is assumed to be performed in a blanket of specialized fusion facility by irradiation of palladium isotopes in resonance neutron spectrum with transformation into stable silver and cadmium isotopes. Transmutation is considered in three variants of the fusion facility: with equal-components dt-plasma, with plasma containing a diminished amount of hyzone (with ddt-plasma) and with dd-plasma, i.e. the transmutation efficiency at transition from dt-plasma to dd-plasma.

УДК 621.039.526:621.039.59

Incineration of Transuranics in Hard Neutron Spectrum \ G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin, and V.V. Sinitsa; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 1 illustration, 2 tables. – References, 6 titles.