

теплоносителей контуров с быстрыми реакторами значительно зависит наряду с традиционными факторами от типа теплоносителя, состава и физико-химического состояния содержащихся в нем примесей. При проектировании узлов с контактными поверхностями, работающими в среде высокотемпературных тяжелых жидкометалли-

ческих теплоносителей, и выборе моделей их эксплуатации необходимо учитывать специфику, определяемую воздействием теплоносителя на происходящие в зоне контакта поверхностей процессы.

Поступила в Редакцию 29.07.09

УДК 550.8:553.495+533.495

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МИРОВОЙ И РОССИЙСКОЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ УРАНА

Шаталов В.В., Тарханов А.В. (ОАО «ВНИИХТ», г. Москва)

Первое десятилетие XXI в. отмечено топливным кризисом, вызвавшим повышенный интерес к ядерной энергетике. Многие страны запланировали ускоренный рост ядерной энергетики. Особенно грандиозны планы стран Юго-Восточной Азии: Китая — рост в 7,9 раза, Индии — 9,4 раза, Японии и Южной Кореи — в 1,5 раза.

С 1991 и до 2008 г. потребности в уране превысили его производство почти на 500 тыс. т. В этих условиях возникает неизбежный вопрос: способна ли минерально-сырьевая база урана обеспечить столь бурный рост ядерной энергетики?

Потребности в уране. Приведенные в статье данные основаны на анализе материалов МАГАТЭ [1], отечественных и зарубежных публикаций. Прогноз потребностей ядерной энергетики выполнен при условии ее обеспечения до середины века тепловыми реакторами, без учета вклада быстрых реакторов, при значительном росте коэффициента использования установленной мощности. Ядерные материалы вторичных источников (уран из хвостов изотопного обогащения и отработавшего топлива, плутоний) могут в перспективе заменить 10% природного урана [2]. Прогноз мировых потребностей в уране составлен с использованием работ [1, 3] (табл. 1).

Таким образом, максимальные потребности в природном уране для ядерной энергетики до 2050 г. составляют примерно 5 млн т. Объемы экспорта урана в твэлах, поставленных по долгосрочным контрактам в Армению, Болгарию, Чехию, Финляндию, Венгрию, Литву, Румынию, Словакию и на Украину, приведены в докладах

Т а б л и ц а 1. Прогноз мировых потребностей урана для варианта высокого темпа развития ядерной энергетики с 2010 по 2050 г.

Годы	Уран, тыс. т
2010—2014	404
2015—2019	462
2020—2024	522
2025—2029	582
2030—2034	640
2035—2039	700
2040—2044	760
2045—2050	984
Всего	5054

этих стран [1, 4]. Страны, в которых строятся в настоящее время или планируются в будущем российские реакторы, не учитывались. Таким образом, если планы будут осуществлены, общие потребности в уране будут значительно выше приведенных в табл. 2.

Значительная доля твэлов экспортируется на Украину, которая обладает значительными запасами урана для полного обеспечения своих атомных электростанций. Однако в настоящее время она производит всего 800 т урана при по-

Т а б л и ц а 2. Прогноз потребностей России в уране с учетом экспорта твэлов с 2010 по 2050 г., тыс. т

Годы	Ядерная энергетика	Экспорт твэлов	Всего
2010—2019	71	52	123
2020—2029	99	52	151
2030—2039	120	46	166
2040—2050	158	53	211
Всего	448	203	651

требности 2400 т [4]. В табл. 2 принято, что к 2020 г. Украина будет производить и поставлять в Россию 3 тыс. т, к 2025 г. — 4 тыс. т, к 2030 г. — 5 тыс. т урана.

Потребности, указанные в табл. 2, являются минимальными, так как они не учитывают отечественный экспорт низкообогащенного урана, составляющий более 10 тыс. т урана в год.

Запасы и ресурсы урана. МАГАТЭ публикует извлекаемые запасы урана с учетом потерь при добыче и гидрометаллургическом переделе (табл. 3). Потери при разных способах производства урана составляют от 9 до 25%. Мировые разведанные запасы урана на 1 января 2007 г. составляли по ценовым категориям менее 40 дол./кг — 2970 тыс. т, менее 80 дол./кг — 4456,4 тыс. т и менее 130 дол./кг — 5468,8 тыс. т [1].

Т а б л и ц а 3. Извлекаемые запасы урана на 1 января 2007 г., тыс. т

Страна	Ценовая категория, дол./кг		
	<40	<80	<130
Австралия	1196	1216	1243
Казахстан	517,3	751,6	817,3
Россия	83,6	495,4	545,6
ЮАР	234,7	343,2	435,1
Канада	352,4	423,2	423,2
США	—	99	339
Бразилия	139,6	231	278,4
Намибия	116,4	230,3	275
Нигер	34,2	75,2	274
Украина	34,1	184,1	199,5
Иордания	111,8	111,8	111,8
Узбекистан	86,2	86,2	111
Другие (31 страна)	63,7	209,4	209,4
Всего	2970	4456,4	5468,8

Прогнозные ресурсы оцениваются по категории P_1 — 3000 тыс. т, категориям $P_2 + P_3$ — 7630 т [4] (табл. 4).

Россия занимает третье место по запасам и второе место по ресурсам урана в мире (см. табл. 3, 4). В основных уранопроизводящих странах доля дешевых запасов достигает, %: Канада 83,3, Австралия 96,2, Казахстан 63,3, Россия 15,3.

В нашей стране более половины запасов и ресурсов урана относятся к месторождениям Эльконского урановорудного района Республики Якутия (Саха). Они входят в ценовую категорию <80 дол./кг, однако по данным нескольких технико-экономических обоснований, состав-

Т а б л и ц а 4. Прогнозные ресурсы урана на 1 января 2007 г., тыс. т

Страна	Категория ресурсов	
	P_1	$P_2 + P_3$
США	1273	1340
Россия	356	600
Казахстан	300	500
Бразилия	300	500
Канада	150	700
ЮАР	110	113
Узбекистан	85	135
Украина	15	255
Чехия	—	179
Монголия	—	1 390
Вьетнам	8	230
Другие	403	1 688
Всего	3000	7630

ленных в последние годы, эти запасы должны быть перенесены в более высокую ценовую категорию <130 дол./кг. Высокая себестоимость запасов обусловлена жильным характером месторождений с малой мощностью рудных тел и трудной вскрываемостью в технологическом процессе, связанной с тем, что в рудах основным урановым минералом является труднорастворимый в кислотах браннерит. Успешное освоение этих месторождений во многом зависит от совершенствования технологии переработки упорных золотобраннеритовых руд, которой занимается институт все последние годы.

Обеспечение запасами и ресурсами ядерной энергетики. При учете суммарных запасов и ресурсов самой надежной категории P_1 фиксируется полное обеспечение природным ураном мировой и российской ядерной энергетики (табл. 5). Обеспеченность запасами различных ценовых категорий рассчитана из мировой потребности ядерной энергетики 5054 тыс. т, российской — 651 тыс. т.

Т а б л и ц а 5. Обеспечение потребностей ядерной энергетики до 2050 г.

Ценовая категория запасов и ресурсов, дол./кг	Мировая		Отечественная	
	Уран, тыс. т	Обеспечение, %	Уран, тыс. т	Обеспечение, %
<40	2970	59	83,6	12,8
<80	4456	88	495,4	76,1
<130	5469	108	545,6	83,8
<130 + P_1	168	168	846,9	130,1

Прогнозные ресурсы P_1 надежно подтверждаются практикой геологоразведочных работ.

Они обычно приурочены к флангам и глубинам известных месторождений или к новым месторождениям, прошедшим стадию поисково-оценочных работ. При учете прогнозных ресурсов категорий P_2 и P_3 обеспеченность потребностей мировой ядерной энергетики составляет 318%. При этом не учтены неиспользуемые в настоящее время ресурсы урана в фосфоритах, углях, лигнитах, карбонатах и месторождения тория. Только ресурсы урана в фосфоритах оцениваются в 22 млн т. Таким образом, запасы и ресурсы природного урана не являются препятствием для развития мировой ядерной энергетики в XXI в.

В нашей стране разведанные запасы даже высокой ценовой категории обеспечивают только 83,8% потребностей ядерной энергетики. Намечено значительное расширение поисковых работ, которое должно привести к открытию новых месторождений урана [4].

Производство урана. В 2007 г. в мире произведено 43 577 т урана, что на 1463 т больше, чем в 2005 г. [1, 4] (табл. 6). Россия занимает шестое место по производству урана и удовлетворяет только 20% своих ежегодных потребностей.

Таблица 6. Производство урана в 2007 г.

Страна	Уран, т
Канада	10 000
Австралия	7600
Казахстан	7245
Намибия	3800
Нигер	3663
Россия	3381
Узбекистан	2300
США	2000
Украина	1000
ЮАР	750
Китай	750
Бразилия	340
Чехия	309
Индия	270
Другие страны	169
Всего	43 577

Основные уранопроизводящие страны планируют значительно увеличить к 2030 г. производство урана [1] (табл. 7). Заявленные планы для всех стран, кроме Иордании, реальны, так как основаны на освоении известных месторождений, запасы которых достаточны для организации намеченного производства.

Таблица 7. Прогноз производства урана до 2030 г., тыс. т

Страна	2010 г.	2015 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.
Казахстан	18	22	23	23	23
Канада	19,27	19,27	19,27	19,27	19,27
Россия	5	12	18	18	18,5
Австралия	10,2	19	22,4	17,7	17,7
Намибия	7	9	8	7	7
ЮАР	4,86	6,32	6,32	6,32	6,32
США	6,1	6,6	6,5	5,6	5,6
Нигер	4,5	10	5,7	5,7	5
Украина	1,5	2	2,7	3,7	3,7
Узбекистан	3	3	3	3,5	3,5
Иордания	2	2	2	2	2
Индия	0,98	1,2	1,6	2	2
Другие (8 стран)	4,31	5,03	4,13	4,26	7,59
Всего	86,72	117,42	122,62	118,05	117,85

До настоящего времени потребности в уране ядерной энергетики значительно превосходят его производство, что привело к дефициту в 500 тыс. т, который компенсируется из вторичных источников (рис. 1). По прогнозам уже к 2010 г. мировое производство урана должно превысить потребности ядерной энергетики и такое положение сохранится почти до 2030 г. (рис. 2). Дальнейшее расширение производства будет осуществляться за счет вновь открываемых месторождений.

Наша страна в настоящее время производит уран на предприятиях уранового холдинга АРМЗ [5, 6]. Всего в 2007 г. произведено 3527 т урана, из которых 3413 т в России (3037 т — ОАО «ППГХО», 350 т — ЗАО «Далур», 26 т — ОАО «Хиагда») и 114 т в Казахстане на совместном предприятии «Заречное». Общие потребности нашей страны не могут быть удовлетворены производством на собственных рудниках,

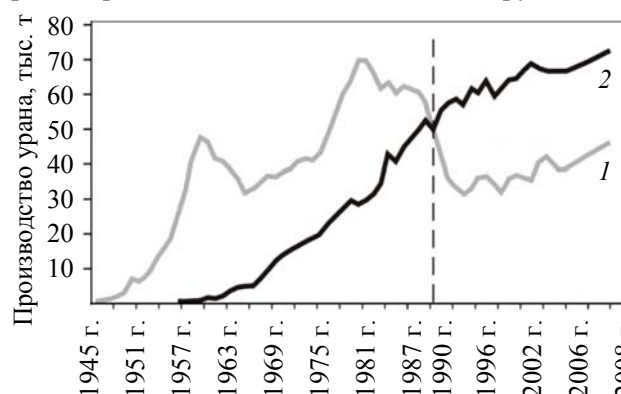
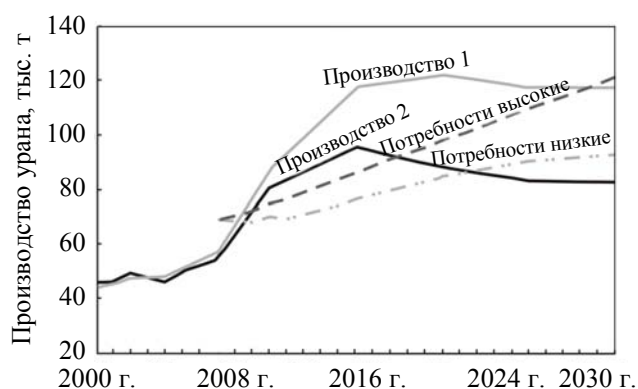


Рис. 1. Соотношение ежегодного мирового производства урана (1) и его потребностей (2)



Р и с. 2. Соотношение потребностей и производства урана до 2030 г.: производство 1 — существующие, строящиеся, планируемые и прогнозируемые уранпроизводящие центры; производство 2 — существующие, строящиеся уранпроизводящие центры

и поэтому необходимо развивать производство в странах ближнего и дальнего зарубежья [5, 6] (табл. 8).

Таблица 8. Прогноз обеспечения атомной промышленности России ураном с 2007 по 2050 г., тыс. т

Годы	Производство урана			
	Российские рудники	Рудники России, СНГ и стран дальнего зарубежья	Дефицит российского урана	Дефицит (избыток) всего производимого урана
2007	35	3,7	−6	−5,8
2007—2009	11,6	17	−19,4	−14
2010	5,04	10,5	−5,4	0
2010—2019	111	156	−4	41
2020	19	27,5	6,3	14,8
2020—2029	195	280	56	141
2030	13,5	21,5	−1,9	6,1
2030—2039	148	233	12	73
2040	19,3	27,8	2,7	11,2
2040—2050	94	179	106	−21
2050	9	17,5	−10,8	−2,3
Всего 2007—2050	570	883	−75	218

В целом проблема обеспечения ядерной энергетики природным ураном в первой половине XXI в. может быть успешно решена при условии форсирования работ, включающих прирост запасов на действующих и строящихся рудниках, освоение резервных месторождений, поиски новых месторождений, создание сов-

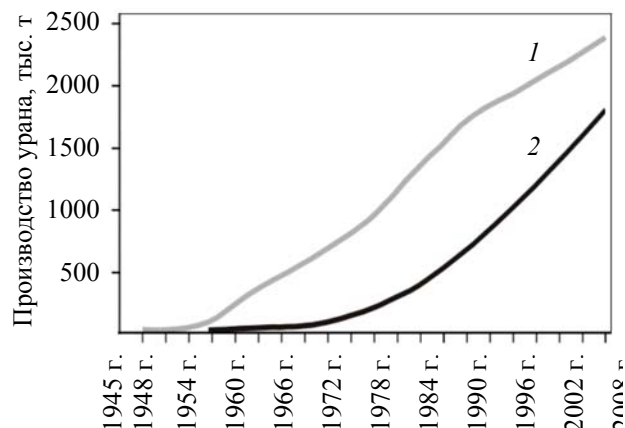
местных предприятий и экспорт урана из стран ближнего и дальнего зарубежья.

До сих пор существует мнение, что российских складских запасов, главным образом, урана из хвостов изотопного обогащения хватит на долгие годы. Эти данные не публикуются, но общее количество урана, оставшегося во вторичных источниках, можно рассчитать по соотношению произведенного с 1945 г. и использованного [1, 4].

По оценке МАГАТЭ [1] с 1945 по 2008 г. мировое производство урана составило 2325 тыс. т, использовано 1700 тыс. т, осталось 625 тыс. т (рис. 3). Из хвостов диффузионного изотопного обогащения по оценке Агентства можно извлечь еще ~450 тыс. т урана. Если принять с большим допущением, что из отработанного топлива можно извлечь до 10%, т.е. около 170 тыс. т, то складские запасы всех форм хранения, в том числе и в виде атомного оружия составляют 1245 тыс. т. На компенсацию дефицита природного урана истрачено около 500 тыс. т, следовательно, не использовано 745 тыс. т. Если использовать только эти запасы, то их для мировой ядерной энергетики хватит всего на 9—10 лет. При этом нужно учесть, что большая часть запасов хранится в виде стратегического атомного оружия. Поэтому можно утверждать, что проблема обеспечения ураном в XXI в. будет решаться путем расширения производства природного урана, а не за счет вторичных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Uranium** 2007: Resources, Production and Demand. A Joint Report by OECD Nuclear Energy Agency and IAEA,



Р и с. 3. Мировое производство (1) и потребление урана (2) с 1945 по 2008 г.

- 2008.
2. Nakicenovic N., Gruber A., Donald A. Global Energy Perspectives. International Institute for Applied Systems Analysis and World Energy Council. Cambridge University Press, 1998.
 3. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Планы развития уранодобывающей промышленности в России. — В сб.: Развитие ядерной энергетики России и Украины — фактор устойчивости межгосударственного сотрудничества. М.: Наука, 2009, с. 69—77.
 4. Тарханов А.В., Шаталов В.В. Новые тенденции развития мировой и российской минерально-сырьевой базы

урана. — В сб.: Минеральное сырье. Сер. геолого-экономическая, 2008, № 26.

5. Живов В.Л. Уранодобывающая отрасль России: состояние и перспективы развития. — Горный журнал, 2008, № 3, с. 6—11.
6. Бойцов А.В., Путивцева Н.В., Басов В.С. Добыча урана в 2007: факты и ожидания. — Вестник Атомпрома, 2008, № 3, с. 24—32.

Поступила в Редакцию 17.09.09

УДК 541.183.621.039.542

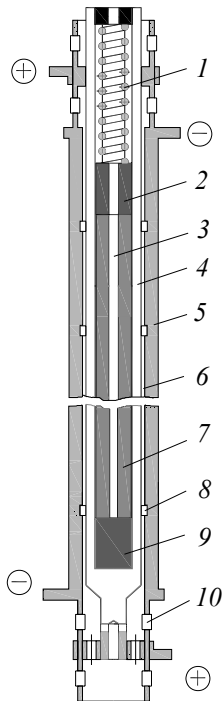
МАССОПЕРЕНОС ДИОКСИДА УРАНА В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ ТОПЛИВНОГО СЕРДЕЧНИКА ТВЭЛА ОДНОЭЛЕМЕНТНОГО ЭГК

Гонтарь А.С., Сотников В.Н. (НИИ НПО «Луч», г. Подольск, Московская обл.)

Радиальный массоперенос диоксида урана в зазоре между сердечником и оболочкой вентилируемого ТВЭЛА одноэлементного ЭГК приводит к ликвидации этого зазора или приближает реальный контакт к идеальному термическому контакту (рис. 1) [1]. Ранее проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали, что радиальный массоперенос во всем диапазоне

реализуемой рабочей температуры оболочки и тепловой мощности ТВЭЛА осуществляется в свободномолекулярном режиме и завершается за малое время (десятки-сотни часов) по сравнению с ресурсом [2]. Таким образом, независимо от исходной конструкции ТВЭЛА возникает непосредственное нагружение оболочки распухающим сердечником.

Продольный массоперенос в центральном канале сердечника изменяет конфигурацию расположения топлива с возможностью блокировки канала конденсатом диоксида урана. Возникающие местные сужения исходного канала вызывают ответное повышение скорости деформации оболочки, а образование замкнутой вакуумно-плотной полости приводит к неприемлемому нагружению оболочки вышедшими из топлива газообразными продуктами деления. Продольный массоперенос вследствие малых осевых градиентов температуры является медленно протекающим процессом, по длительности сравним с ресурсом, поэтому требует детальных исследований с учетом следующих сопутствующих факторов: циклическое участие в массопереносе кислорода при сверхстехиометрическом составе диоксида урана, изменение кислородного коэффициента диоксида урана вследствие ухода кислорода в газовой фазе из системы и поступления дополнительного кислорода из диоксида при выгорании урана, локальные утечки тепла из сердечника через систему



Р и с. 1. Конструктивная схема одноэлементного ЭГК: 1 — фиксирующий узел; 2 — верхний торцевой отражатель; 3 — центральный канал; 4 — оболочка (эмиттер); 5 — коллектор; 6 — межэлектродный зазор; 7 — топливный сердечник; 8 — дистанционер; 9 — нижний торцевой отражатель; 10 — сильфонно-гермоводный узел