

Туманов Ю.Н.

**Плазменные,  
высокочастотные,  
микроволновые и  
лазерные технологии  
в  
химико-металлургических  
процессах**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ ®

УДК 658.51.011.56.003.1

ББК 30.61

Т 83



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту 09-03-07030*

Туманов Ю.Н. **Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 968 с. — ISBN 978-5-9221-1211-6.

В книге рассмотрены применения технологической плазмы, радиочастотных и микроволновых полей, а также лазеров в химико-металлургических производствах, в частности, в ядерном топливном цикле (ЯТЦ). Рассмотрены комбинации электротехнологий с процессами экстракционного, сорбционного и ректификационного аффинажа. Проанализирован уровень энергооснащенности плазменных и частотных технологий для химико-технологических и металлургических приложений: электродуговых, высокочастотных и микроволновых плазмотронов, источников электропитания, вспомогательной техники. Рассмотрены комбинированные генераторы технологической плазмы. Предложены химико-металлургические электротехнологии нового поколения, в которых, в принципе, не создаются отходы и отвалы. Одной из них является плазменно-электромагнитная технология восстановления урана из гексафторида урана, отвального по изотопу U-235. Рассмотрены комбинации фторидной технологии ЯТЦ, газопламенной, плазменной, сопловой и лазерной технологий, сформулированы новые направления развития нанотехнологии и микрометаллургии применительно к получению дисперсных и объемных металлических и керамических наноматериалов, а также готовых микро- и макроизделий. Приведены основные составляющие технико-экономической эффективности новых электротехнологий, проанализировано их влияние на биосферу, в частности, в процессах ЯТЦ; предложены новые схемы ЯТЦ с более высоким уровнем социальной адаптации.

Книга адресована научным сотрудникам и инженерам, работающим в области нанотехнологий, плазменных технологий химико-металлургического профиля применительно к ЯТЦ и к смежным областям техники, а также профессорско-преподавательскому составу, аспирантам и студентам старших курсов, специализирующимся в области экологии, ядерного топливного цикла, нанотехнологий, порошковой металлургии и плазменных процессов в производстве редких и редкоземельных металлов.

ISBN 978-5-9221-1211-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2010

© Ю.Н. Туманов, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	12
Список литературы . . . . .	22
<b>Глава 1. Роль ядерной энергетики в решении энергетических, технологических и экологических проблем.</b> . . . . .	<b>23</b>
§ 1.1. Введение . . . . .	23
§ 1.2. Междисциплинарность . . . . .	24
§ 1.3. Культура безопасности . . . . .	24
§ 1.4. Новые технологии . . . . .	25
§ 1.5. Структура мировой энергетики. . . . .	29
§ 1.6. Роль ядерной энергетики в мировом энергообеспечении . . . . .	35
§ 1.7. Структура и стоимость ядерного топливного цикла . . . . .	42
§ 1.8. Интеграция ядерной энергетики РФ в мировую энергетику в начале 21 столетия . . . . .	45
§ 1.9. Перспективные направления развития ядерного топливного цикла, основанные на применении электротехнологий. . . . .	53
Список литературы . . . . .	60
<b>Глава 2. Энергетический базис плазменных и частотных технологий для химико-технологических и металлургических приложений.</b> . . . . .	<b>62</b>
§ 2.1. Причинно-исторический очерк развития плазменной техники . . . . .	62
§ 2.2. Электропитание дуговых плазмотронов на постоянном токе . . . . .	64
§ 2.3. Электропитание дуговых плазмотронов на переменном токе . . . . .	66
§ 2.4. Электродуговые плазмотроны на постоянном токе для химико-металлургических приложений. . . . .	68
§ 2.5. Обобщенные уравнения для расчета параметров электродуговых плазмотронов . . . . .	74
§ 2.6. Электродуговые плазмотроны постоянного тока с полыми трубчатыми электродами, нашедшие промышленное применение . . . . .	78
§ 2.7. Электродуговые плазмотроны постоянного тока со стержневым катодом и коаксиальным анодом, нашедшие промышленное применение . . . . .	83
§ 2.8. Источники электропитания дуговых плазмотронов . . . . .	85
§ 2.9. Проблемы износа электродов дуговых плазмотронов . . . . .	91
§ 2.10. Практические результаты по определению эрозии электродов электродуговых плазмотронов и мероприятия по повышению ресурса электродов . . . . .	101
§ 2.11. Исследование ресурса работы электродуговых плазмотронов постоянного тока с полыми трубчатыми электродами . . . . .	113
§ 2.12. Частотные плазмотроны . . . . .	119
§ 2.13. Оптические разряды ( $K \ll 1$ ) . . . . .	121

§ 2.14. Сверхвысокочастотные (микроволновые) разряды . . . . .	125
§ 2.15. Ультракоротковолновые (УКВ) разряды . . . . .	145
§ 2.16. Высокочастотные емкостные (ВЧЕ) разряды и плазмотроны . . . . .	146
§ 2.17. Высокочастотные индукционные (ВЧИ) плазмотроны . . . . .	147
§ 2.18. Общий анализ состояния плазменной техники для промышленных применений в химической технологии, металлургии и технологии обработки материалов . . . . .	166
Список литературы . . . . .	170
<b>Глава 3. Плазменные технологии в экстрактивной металлургии редких, радиоактивных и прочих металлов . . . . .</b>	<b>172</b>
§ 3.1. Экологические проблемы экстрактивной металлургии . . . . .	172
§ 3.2. Плазменная технология переработки цирконийсодержащих минералов . . . . .	174
§ 3.3. Возможности использования плазменно-фторидной технологии переработки цирконийсодержащих минералов . . . . .	181
§ 3.4. Применение плазменной технологии для извлечения никеля и других металлов из минерала серпентина . . . . .	186
§ 3.5. Плазменная технология в экстрактивной металлургии вольфрама и молибдена: выделение дисперсных порошков вольфрама и молибдена из аммонийных солей вольфрамовой и молибденовой кислот . . . . .	188
§ 3.6. Другие плазменные процессы вскрытия рудного сырья с получением оксидов металлов и металлов . . . . .	190
§ 3.7. Общий анализ уровня техники и технологии в области плазменного вскрытия рудных минералов и концентратов . . . . .	193
§ 3.8. Возможные применения плазменной техники в технологии вскрытия ториевых руд . . . . .	201
§ 3.9. Нестандартные применения высокотемпературной обработки руд и рудных концентратов . . . . .	203
Список литературы . . . . .	204
<b>Глава 4. Плазменная технология получения оксидов металлов из растворов, реэкстрактов и расплавов гидратированных солей . . . . .</b>	<b>206</b>
§ 4.1. Принципы технологии . . . . .	206
§ 4.2. Схематическое представление плазменного процесса разложения нитратных растворов урана на оксиды урана и азотную кислоту . . . . .	208
§ 4.3. Математическое моделирование процесса разложения дезинтегрированного раствора нитрата уранила в воздушной плазме . . . . .	211
§ 4.4. Результаты расчета процесса, проверка на адекватность экспериментальным данным . . . . .	218
§ 4.5. Некоторые вопросы тепло- и массообмена и кинетики химических реакций при взаимодействии химически активных систем с потоками плазмы . . . . .	224
§ 4.6. Разложение полидисперсно распыленных нитратных растворов металлов в потоке плазмы . . . . .	232
§ 4.7. Разработка плазменного процесса получения оксидов регенерированного урана . . . . .	240
§ 4.8. Плазменный процесс разложения растворов уранилнитрата на оксиды урана и раствор азотной кислоты . . . . .	243

§ 4.9. Описание работы плазменной установки для переработки растворов; результаты экспериментов и испытаний . . . . .	249
§ 4.10. Получение оксидов регенерированного урана для производства гексафторида урана: разработка и проектирование крупномасштабного плазменного оборудования для производства оксидов регенерированного урана из уранилнитратных реэкстрактов . . .	253
§ 4.11. Технико-экономическое сравнение плазменного и гидрохимического процессов получения оксидов урана . . . . .	258
§ 4.12. Производство оксидов урана для изготовления сердечников твэлов плазменным разложением нитратных реэкстрактов регенерированного урана . . . . .	262
§ 4.13. Поведение примесей, содержащихся в плаве гексагидрата нитрата уранила, полученном из реэкстрактов регенерированного урана в процессе плазменной денитрации . . . . .	268
§ 4.14. Неурановые крупномасштабные применения плазменной технологии для получения оксидных материалов из нитратных растворов: разработка плазменного процесса получения оксида магния для нанесения служебных покрытий на электротехническую сталь . . . . .	283
Список литературы . . . . .	293
<b>Глава 5. Получение оксидных композиций в процессах плазменной и частотной денитрации смесевых нитратных растворов металлов . . . . .</b>	<b>295</b>
§ 5.1. Использование оксидных композиций в ядерном топливном цикле . . . . .	295
§ 5.2. О возможности получения топливных оксидных композиций плазменным разложением смесевых нитратных растворов . . . . .	298
§ 5.3. Получение уран-хромовой оксидной композиции . . . . .	298
§ 5.4. Микроволновая технология производства уран-плутониевых, уран-ториевых и прочих оксидных композиций . . . . .	305
§ 5.5. Микроволновая плазменная технология получения оксидного смесевоего U-Th- и U-Pu-топлива . . . . .	307
§ 5.6. Неядерные применения процесса разложения смесевых нитратных растворов для получения оксидных композиций; получение оксидных композиций, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью . . . . .	315
§ 5.7. Морфология частиц, полученных способом плазменной денитрации нитратного сырья . . . . .	321
§ 5.8. Исследование кинетики химических реакций в условиях плазменного нагрева . . . . .	324
§ 5.9. Заключение . . . . .	334
Список литературы . . . . .	337
<b>Глава 6. Использование плазменной карботермии для восстановления урана из оксидного сырья . . . . .</b>	<b>340</b>
§ 6.1. Роль металлического урана в ядерном топливном цикле . . . . .	340
§ 6.2. Термодинамика процесса карботермического восстановления урана из оксидного уранового сырья . . . . .	342
§ 6.3. Достигнутый уровень техники и технологии карботермического производства урана из оксидного сырья . . . . .	348

§ 6.4. Восстановление урана из оксидного уранового сырья в плазменной шахтной печи . . . . .	355
§ 6.5. Рафинирование урана в электронно-плазменной печи . . . . .	366
§ 6.6. Современный уровень плазменной техники и технологии для осуществления процесса плазменно-карботермического восстановления урана из оксидного сырья на новом витке развития . . . . .	376
§ 6.7. Уровень развития электрометаллургии, основанной на применении технологии «холодный тигель» . . . . .	380
§ 6.8. Предлагаемая схема плазменного карботермического восстановления природного и регенерированного урана из оксидного сырья на современном уровне . . . . .	381
Список литературы . . . . .	384
<b>Глава 7. Высокочастотные индукционные процессы получения карбидных и боридных материалов для ядерной энергетики и обрабатывающей промышленности . . . . .</b>	<b>385</b>
§ 7.1. Материаловедческие проблемы в развитии техники . . . . .	385
§ 7.2. Применение бескислородных керамических материалов в атомной энергетике и в общем и специальном машиностроении . . . . .	389
§ 7.3. Высокочастотные газофазные процессы получения бескислородных керамических материалов . . . . .	392
§ 7.4. Научно-технические принципы синтеза карбидных материалов в высокочастотном электромагнитном поле . . . . .	400
§ 7.5. Основные расчетные соотношения, описывающие высокочастотный синтез . . . . .	405
§ 7.6. Механизм высокочастотного синтеза: взаимодействие высокочастотного электромагнитного поля с химически активной, переменной по электрофизическим свойствам нагрузкой . . . . .	408
§ 7.7. Разработка принципов аппаратного оформления процесса синтеза карбидов и родственных соединений в высокочастотном электромагнитном поле . . . . .	420
§ 7.8. Высокочастотная индукционная установка «Плутон-3» . . . . .	436
§ 7.9. Расчет металлodieлектрического реактора . . . . .	443
§ 7.10. Отработка непрерывного режима процесса получения карбида бора на установке «Плутон-3» . . . . .	452
§ 7.11. Выявление параметров регулирования с целью автоматизации установок «Плутон»; разработка технологической линии для производства карбида бора . . . . .	455
§ 7.12. Частотные процессы в технологии получения карбидов других элементов, боридов и других тугоплавких соединений . . . . .	469
§ 7.13. Заключение . . . . .	472
Список литературы . . . . .	476
<b>Глава 8. Высокочастотные и плазменные процессы в технологии извлечения фтора из фторсодержащих природных и синтетических минералов . . . . .</b>	<b>479</b>
§ 8.1. Высокочастотный процесс выделения фтора из флюорита в виде фторида водорода . . . . .	481
§ 8.2. Анализ результатов по плазменно-дуговым карботермическим процессам извлечения фтора из флюорита в виде фторидов углерода . . . . .	483

§ 8.3. Процесс конверсии флюорита в карбид кальция и фториды углерода при низкочастотном прямом индукционном нагреве шихты $\text{CaF}_2 + 5/2\text{C}$ . . . . .	488
§ 8.4. Процесс конверсии флюорита в карбид кальция и фториды углерода при высокочастотном прямом индукционном нагреве шихты $\text{CaF}_2 + 5/2\text{C}$ . . . . .	490
§ 8.5. Плазменно-дуговой процесс конверсии флюорита в карбид кальция и фториды углерода при нагреве шихты $\text{CaF}_2 + 5/2\text{C}$ . . . . .	501
§ 8.6. Комбинированный процесс плазменно-высокочастотной конверсии флюорита в карбид кальция и фториды углерода при электротермической обработке шихты $\text{CaF}_2 + 5/2\text{C}$ . . . . .	503
§ 8.7. Плазменная технология извлечения фтора из выхлопных газов фтористоводородного производства . . . . .	507
§ 8.8. Плазменно-сорбционная технология извлечения чистого кремния для микроэлектронных приложений и фторида водорода из синтетических фторсодержащих минералов . . . . .	515
§ 8.9. Высокотемпературное оборудование для получения гексафторида урана фторированием фторидного и оксидного уранового сырья . . . . .	524
Список литературы . . . . .	536
<b>Глава 9. Плазменные и лазерные процессы в технологии разделения изотопов урана . . . . .</b>	<b>538</b>
§ 9.1. Введение . . . . .	538
§ 9.2. Краткая характеристика состояния промышленной технологии разделения изотопов урана; взаимоотношения центрифужной и лазерной технологий . . . . .	540
§ 9.3. Плазменные технологии, предлагаемые для разделения изотопов урана . . . . .	546
§ 9.4. Разделение изотопов урана методом лазерного фотовозбуждения . . . . .	552
§ 9.5. Лазерное изотопное разделение атомного пара (AVLIS) . . . . .	554
§ 9.6. Коммерческая реализация процесса AVLIS . . . . .	560
§ 9.7. Лазерное молекулярное изотопное разделение (MLIS) . . . . .	565
§ 9.8. Конструкция разделительного каскада . . . . .	569
§ 9.9. Метод JANAI-LIS для разделения изотопов урана . . . . .	570
§ 9.10. Расширение области применения метода MLIS . . . . .	572
Список литературы . . . . .	572
<b>Глава 10. Разработка новых безотходных физических технологий получения материалов: технологические применения уран-фторной плазмы . . . . .</b>	<b>574</b>
§ 10.1. Общие сведения об уран-фторной плазме . . . . .	574
§ 10.2. Физико-химические процессы в гексафториде урана при высоких температурах . . . . .	575
§ 10.3. Практические результаты по получению устойчивых потоков уран-фторной плазмы . . . . .	583
§ 10.4. Параметры потоков радиочастотной (U-F)-плазмы как объекта химико-металлургических приложений . . . . .	608
§ 10.5. Анализ блоков высокочастотного источника электропитания для получения потоков уран-фторной плазмы . . . . .	617

§ 10.6. Анализ влияния параметров металлодиэлектрического плазмотрона на связь источника электропитания с потоком высокочастотной индукционной уран-фторной плазмы . . . . .	622
§ 10.7. Разделение компонентов уран-фторной плазмы . . . . .	629
§ 10.8. Некоторые практические результаты по реализации плазменно-электромагнитной технологии выделения урана и фтора из потоков уран-фторной плазмы . . . . .	638
§ 10.9. Общая технологическая схема пилотного завода, работающего по плазменно-электромагнитной технологии конверсии отвального гексафторида урана на металлический уран и элементный фтор . . . . .	642
§ 10.10. Перспективные схемы получения потоков уран-фторной плазмы . . . . .	645
§ 10.11. Химико-металлургические приложения генератора уран-фторной технологической плазмы . . . . .	660
Список литературы . . . . .	660
<b>Глава 11. Технологические применения водопаровой плазмы: конверсия отвального по изотопу U-235 гексафторида урана . . .</b>	<b>663</b>
§ 11.1. Экологические и экономические проблемы, возникшие в связи с накоплением отвального по изотопу U-235 гексафторида урана . . . . .	663
§ 11.2. Основные принципы плазменной технологии конверсии гексафторида урана в водопаровой плазме на оксиды урана и безводный фторид водорода . . . . .	667
§ 11.3. Экспериментальное исследование конверсии отвального по изотопу U-235 гексафторида урана в потоке водопаровой плазмы: характеристика пилотного завода . . . . .	681
§ 11.4. Результаты экспериментальных исследований процесса конверсии отвального по изотопу U-235 гексафторида урана в водопаровой плазме: комиссионные испытания пилотного завода . . . . .	685
§ 11.5. Плазменно-ректификационная технология конверсии отвального по изотопу U-235 гексафторида урана . . . . .	686
§ 11.6. Принципы работы водопарового плазмотрона . . . . .	688
§ 11.7. Плазменно-водородная технология переработки отвального по изотопу U-235 гексафторида урана в металлический уран и безводный фторид водорода . . . . .	706
Список литературы . . . . .	732
<b>Глава 12. Плазменная технология в процессах получения оксидного ядерного топлива из гексафторида урана для энергетических реакторов . . . . .</b>	<b>736</b>
§ 12.1. Технология производства оксидного ядерного топлива . . . . .	736
§ 12.2. Критерии оценки качества дисперсного керамического диоксида урана . . . . .	739
§ 12.3. Плазменная технология конверсии слабообогатщенного по U-235 (до 5 %) гексафторида урана в оксиды урана и раствор фтористоводородной кислоты . . . . .	745
§ 12.4. Кинетика конверсии $UF_6$ в (H–OH)-плазме и образования (U–F–N–O–H)-плазмы . . . . .	748
Список литературы . . . . .	753



Глава 13. <b>Новая техника и технология разделения газовых и дисперсных продуктов плазмохимических процессов</b> . . . . .	754
§ 13.1. Характеристика проблемы разделения компонентов двухфазных технологических потоков. . . . .	754
§ 13.2. Общий технологический подход к решению проблемы разделения дисперсных и газовых продуктов плазменных технологических процессов . . . . .	757
§ 13.3. Сепарации дисперсной и газовой фаз, выходящих из плазменных реакторов, в вихревых пылеуловителях . . . . .	763
§ 13.4. Сепарация дисперсных и газовых продуктов плазменных процессов при фильтрации двухфазных технологических сред через металлокерамические фильтры; некоторые общие сведения по изготовлению и работе металлокерамических фильтров . . . . .	773
§ 13.5. Механизм сепарации дисперсных и газовых продуктов плазмотехнологических процессов . . . . .	776
§ 13.6. Разработка двухслойных фильтроэлементов . . . . .	780
§ 13.7. Технология регенерации металлокерамических фильтров . . . . .	788
§ 13.8. Экспериментальное обоснование оптимальных размеров узла эжекционной импульсной регенерации фильтра. . . . .	792
§ 13.9. Методика расчета металлокерамического фильтра . . . . .	797
§ 13.10. Ресурсные испытания двухслойных фильтроэлементов . . . . .	802
§ 13.11. Уровень техники для разделения тонкодисперсной и газовой фаз на основе многослойных металлокерамических и керамических фильтров, разработанных в РНЦ «Курчатовский институт». . . . .	804
§ 13.12. Перспективная схема разделения дисперсных и газовых продуктов плазмохимических процессов . . . . .	808
Список литературы . . . . .	812
Глава 14. <b>Частотная технология производства ядерночистого циркония, гафния, скандия и других редких и редкоземельных металлов</b> . . . . .	814
§ 14.1. Введение . . . . .	814
§ 14.2. Роль циркония в ядерной энергетике. . . . .	815
§ 14.3. Некоторые замечания относительно технологии производства циркония для ядерной энергетике. . . . .	816
§ 14.4. Высокочастотный индукционный плавитель прямого нагрева типа «холодный тигель» для восстановления и плавки металлов . . . . .	818
§ 14.5. Процессы и оборудование для восстановления циркония, редких и редкоземельных элементов с использованием технологии «холодного тигля» . . . . .	828
§ 14.6. Использование прямого индукционного нагрева для рафинирования металлов и сплавов . . . . .	830
§ 14.7. Конструкции и изготовление металлургических «холодных тиглей». . . . .	832
§ 14.8. Индукционная плавка металлов в «холодном тигле» с электромагнитным обжатием металла . . . . .	836
§ 14.9. Комбинированное плазменно-частотное оборудование для производства металлов и сплавов . . . . .	841
Список литературы . . . . .	847

<b>Глава 15. Использование микроволновой, высокочастотной и плазменной техники и технологии для переработки радиоактивных отходов</b> . . . . .	848
§ 15.1. Общая ситуация с накоплением и переработкой радиоактивных отходов (РАО) . . . . .	848
§ 15.2. Существующие промышленные технологии переработки и остекловывания высокоактивных жидких радиоактивных отходов (ВАО) . . . . .	852
§ 15.3. Новые подходы к технологии переработки жидких радиоактивных отходов (ЖРАО): микроволновая технология . . . . .	863
§ 15.4. Высокочастотная технология переработки радиоактивных отходов . . . . .	866
§ 15.5. Плазменная технология переработки конденсированных радиоактивных отходов . . . . .	869
§ 15.6. Совмещенная плазменно-индукционная технология переработки конденсированных радиоактивных отходов . . . . .	880
Список литературы . . . . .	892
<b>Глава 16. Технологии ядерного топливного цикла для создания нового научно-технического базиса производства дисперсных и компактных наноматериалов</b> . . . . .	894
§ 16.1. Характеристика фторидного сырья для производства наноматериалов . . . . .	896
§ 16.2. Существующий технологический базис производства ультрадисперсных материалов, покрытий и изделий: плазменная и газопламенная техника и технологии — прототипы соответствующих нанотехнологий . . . . .	897
§ 16.3. Новые структурные элементы газопламенной и плазменной технологий для крупномасштабного получения дисперсных наноматериалов . . . . .	908
§ 16.4. Новые проекты получения нанодисперсных вольфрамовых материалов из гексафторида вольфрама с использованием водорода и углеводородов . . . . .	917
§ 16.5. Новые проекты получения компактных изделий из дисперсных наноматериалов на основе плазменной технологии совмещенного прессования и спекания . . . . .	922
§ 16.6. Фторидная и лазерная технологии для получения моно- и поликристаллических микроизделий (стержней) из вольфрама, молибдена и карбида вольфрама . . . . .	929
§ 16.7. Как выглядит новый технологический базис получения наноматериалов при синтезе фторидной, газопламенной, плазменной и лазерной технологий? . . . . .	939
Список литературы . . . . .	943
<b>Глава 17. Анализ общей гипотетической схемы ядерного энергетического цикла, модернизированного на основе электротехнологии, с технической, экологической и экономической точек зрения</b> . . . . .	945
§ 17.1. Плазменная технология в экстрактивной металлургии . . . . .	949
§ 17.2. Плазменная техника и технология для получения оксидов урана из реакторов аффинажных и регенерационных заводов . . . . .	950

---

§ 17.3. Плазменный процесс бесшлакового восстановления урана из оксидного сырья . . . . .	951
§ 17.4. Плазменно-ректификационная технология конверсии отвального по изотопу U-235 гексафторида урана в триураноктаоксид и безводный фторид водорода . . . . .	952
§ 17.5. Частотная техника для получения карбидных, боридных и металлических материалов и для других приложений . . . . .	953
§ 17.6. Плазменно-электромагнитная технология восстановления металлов из летучего фторидного сырья . . . . .	955
§ 17.7. Новые системы разделения конденсированных и газовых продуктов и тонкой очистки газовых выхлопов технологических установок . . . . .	957
§ 17.8. Электротехнический базис плазменных и высокочастотных процессов, относящихся к химико-металлургическим стадиям ЯТЦ; электродуговые, высокочастотные и микроволновые генераторы технологической плазмы, а также лазеры . . . . .	958
§ 17.9. Техничко-экономическая эффективность плазменных химико-металлургических процессов ЯТЦ . . . . .	960
§ 17.10. Возможные варианты схемы ядерного энергетического цикла, модернизированного на основе электротехнологии . . . . .	961
Список литературы . . . . .	967

## Предисловие

Русский философ Александр Панарин в одной из своих последних работ [1] охарактеризовал нынешнее положение «мирового сообщества» как эпоху духовных катастроф, основной причиной которых является выгодная США «консервация модерна», которая становится разрушительной для всего остального мира. Под модерном понимается «... перманентная способность к переменам, к критическому самозменению на основе беспокойной, обращенной на себя рефлексии». Но (по Панарину) «консервацией модерна» дело не ограничивается, в практику настойчиво внедряется контрмодерн, частным проявлением которого является рыночная экономика в том виде, в каком она навязана России и многим другим странам, «... отражающая не состояние модерна, а эпоху колониальных захватов». За духовными катастрофами прогнозируются катастрофы материальные, среди которых выделим, применительно к теме статьи, две.

Энергетическая катастрофа — грядущее исчерпание планетарных запасов углеводородного топлива, о котором Римский клуб в конце прошлого столетия оповестил мир своими ширококвещательными докладами, из которых следовал практический вывод: земных энергетических ресурсов для всех не хватит. Этот вывод дал новое направление развитию почти забытой теории Мальтуса. На Западе нашлись силы, сформулировавшие новое стратегическое решение: использовать дефицитные планетарные ресурсы исключительно для процветания западного меньшинства человечества — так называемого «золотого миллиарда».

Экологическая катастрофа — разрушение биосферы в результате хозяйственной деятельности человека, которое идет нарастающим темпом, несмотря на попытки законодательно ограничить поступление в биосферу отходов этой деятельности не только в национальных, но и в международных масштабах (например, Киотский протокол).

Энергетическая катастрофа является таковой только для людей, решающих социальные проблемы на основе контрмодерна. С нашей точки зрения никакой энергетической катастрофы вообще не должно произойти: развитие науки и техники сравнительно давно позволило сформулировать проекты решения энергетических проблем. Проблемой является лишь то, что затраты на реализацию некоторых из этих проектов обременительны для решения на уровне отдельной страны;

решить их можно на уровне «мирового сообщества» в лучшем понимании этого определения.

Из стратегических энергетических проектов обоснованно сформулированы четыре:

- крупномасштабная атомная энергетика, основанная на использовании реакторов на быстрых нейтронах при конечном решении проблемы утилизации радиоактивных отходов [2];
- водородная энергетика, под которой понимается использование водорода как энергоносителя и водородно-кислородных топливных элементов как генераторов электроэнергии [3–5];
- управляемый термоядерный синтез [6];
- альтернативная энергетика, основанная на возобновляемых ресурсах: солнечная и геотермальная, энергия ветра, приливов, отливов и пр. По своему потенциалу она не претендует на глобальную роль, но эффективно решает энергетические проблемы в отдельных регионах [7–8].

Эти проекты, будучи реализованными, позволят качественно ослабить нагрузку энергетической промышленности и транспорта на биосферу.

Однако разрушение биосферы происходит из-за выделения отходов не только энергогенерирующими предприятиями, но и разнообразными химико-металлургическими производствами. Развитие модерна применительно к этим производствам должно быть основано, по нашему мнению, на широком использовании электротехнологий нового поколения в сочетании с новыми аффинажными технологиями. Следует установить три основных критерия эффективности и полезности таких технологий:

- требуемые физико-химические и прочие свойства синтезированных материалов;
- отсутствие техногенного воздействия производства на биосферу (отсутствие отходов);
- приемлемые технико-экономические показатели технологии.

Под новыми электротехнологиями получения неорганических материалов мы понимаем технологии, основанные на применении генераторов и потоков технологической плазмы в химико-металлургических производствах, электромагнитных полей различного частотного диапазона для синтеза и обработки металлических и керамических материалов, технологических лазеров, например, для расширения возможностей плазменной технологии и для получения готовых микроизделий в нанотехнологии и пр. Все эти технологии становятся принципиально и технически осуществимыми в сочетании с аффинажными технологиями подготовки сырья в жидком и газообразном состоянии. В первую очередь следует отметить аффинажные технологии ядерного топлив-

ного цикла (ЯТЦ): сорбцию, жидкостную экстракцию, ректификацию, позволяющие достигать любого уровня чистоты сырья.

Большинство технологических процессов основано на применении трех агрегатных состояний вещества: твердого, жидкого и газообразного. Плазменное состояние в прикладном плане пока освоено фрагментарно, в основном с периферии. В чем причина повышенного внимания научных и промышленных организаций к процессам плазменной технологии в течение более 30 лет: с начала 60-х годов и до начала 90-х, когда естественный ход развития новых направлений науки и техники в СССР был прерван известными преобразованиями в экономике и общественной жизни? Ответов на этот вопрос может быть много. Одни указывают на то, что использование плазменного состояния вещества позволяет на порядки увеличить концентрацию энергии в технологическом или металлургическом реакторе, в сравнении с процессами, проводимыми в трех других состояниях. Удельную мощность можно менять в интервале  $10^2$ – $10^5$  Вт/см<sup>3</sup>, поверхностную мощность на границе раздела фаз — в диапазоне  $10^2$ – $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. По мнению других, в плазме резко увеличиваются скорости технологических процессов и выход целевых продуктов, радикально сокращаются затраты реагентов, уменьшается количество отходов и пр. Наконец, многие указывают на высокий энергетический КПД процессов, обусловленный, главным образом, высоким КПД источников электропитания.

Все это, однако, лишь составляющие технико-экономической эффективности любой технологии [9]. При анализе коммерческой и социальной эффективности электротехнологических процессов получения и обработки материалов обнаружено, что основными составляющими эффективности являются следующие: более короткий и безопасный технологический маршрут при уменьшении числа стадий; снижение потерь материалов и амортизационных отчислений за счет замены емкостного оборудования со сравнительно низким ресурсом работы на электротехническое оборудования с большим ресурсом; радикальное сокращение затрат реагентов, промышленных отходов, техногенной нагрузки на биосферу; качественные показатели продукции; повышение социальной притягательности производства и многое другое.

Первые практические мероприятия по освоению плазменного состояния вещества относятся к началу XX-го столетия. Крупномасштабное использование электродугового плазменного реактора для промышленного получения химических продуктов началось в 1900 г. в Норвегии. Тогда Биркеланд и Эйде осуществили промышленный синтез монооксида (NO) азота из воздуха, поток которого пропускали через электрическую дугу переменного тока. Примерно в это же время в США Лавджой и Брэдли синтезировали NO в электродуговом разряде на постоянном токе. Позднее специалисты германской фирмы

«Hüls» разработали электродуговую технологию производства ацетилена из природного газа; реализованы и другие приложения. Однако недостаточно высокий уровень самой плазменной техники не позволил развить практическое освоение плазменного состояния вещества. Некоторым исключением длительное время являлся «Hüls» — процесс и электроразрядное производство озона.

Дальнейший подъем интереса к освоению плазменного состояния вещества произошел в начале 60-х гг. прошлого столетия, что обусловлено впечатляющим прогрессом в смежных областях науки и технологии. Современные генераторы технологической плазмы (плазмотрон, источник электропитания, системы питания, контроля и управления) являются побочными продуктами развития космической, ядерной и военной техники. Развитие и применение получили три вида генераторов: электродуговые генераторы на постоянном токе, высокочастотные и микроволновые генераторы. Позднее для конструирования плазмотронов стали применять лазеры [10].

Основная задача монографии — зафиксировать и проанализировать технологические достижения в области развития плазменной технологии вплоть до настоящего времени. Для того, чтобы этот анализ не выглядел набором вкусовых химико-металлургических приложений, рассмотрим в основном применения плазменных технологий в одной отрасли промышленности — в ядерном топливном цикле (ЯТЦ). Анализ применения плазменной технологии в промышленности, обслуживающей ЯТЦ, наиболее показателен, поскольку эта отрасль промышленности в значительной степени обслуживает себя сама. Кроме того, плазменная технология получения и обработки материалов является физической технологией, она мало восприимчива к виду обрабатываемого сырья и поэтому используется и в неурановых приложениях, формируя экологически взвешенный подход к технологии производства неорганических материалов.

Начало научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по применению плазменного состояния вещества в целях получения урановых материалов для ядерного топливного цикла в СССР следует отнести к 1962 г. Примерно в это же время низкотемпературная плазма заняла заметное место в развитии различных направлений науки и техники: в металлургии, в химической технологии, в технике обработки материалов. У истоков развития этих направлений в СССР стояли проф. Л. С. Полак и академик РАН Н. Н. Рыкалин. Развитие прикладных работ в области плазменной технологии и металлургии активизировало разработку генераторов потоков низкотемпературной плазмы. Основное продвижение в разработке и создании электродуговых генераторов плазмы сделано на основе работ академика РАН М. Ф. Жукова; развитие высокочастотных генераторов обя-

зано работам школы Н. Н. Рыкалина, академика РАН Ю. В. Цветкова и проф. С. В. Дресвина; развитие микрогенераторов плазмы применительно к решению химико-металлургических проблем — работам академика РАН В. Д. Русанова.

Автор настоящей книги работал в 1962 г. младшим научным сотрудником ВНИИ химической технологии и оказался вовлеченным в это новое направление совершенно случайно, как это часто бывает. Моя трудовая деятельность и работа в области физики, химии и технологии плазмы началась с того, что я был включен в группу физиков, занявшихся плазменной технологией разделения изотопов урана с помощью бегущей электромагнитной волны и плазменной центрифуги. В этой группе я был единственным, имевшим базовое химическое образование (я окончил в 1960 г. химический факультет Ленинградского государственного университета), и возможно поэтому, изучив хрестоматийный материал по свойствам плазмы различных газовых разрядов, обратил внимание на то, чем совершенно пренебрегали физики: на радиационнотермическую и фотохимическую неустойчивость объекта разделения — молекул гексафторида урана. По моим расчетам выходило, что в условиях высокочастотных разрядов низкого давления молекулы  $UF_6$  должны распадаться на молекулы  $UF_5$ ,  $UF_4$ ,  $UF_3$ ,  $F_2$  и атомы F. Кроме того, должны возникать положительно и отрицательно заряженные ионы, так что первоначальная задача разделить изотопы урана в молекулах  $UF_6$  неизмеримо усложнялась. Однако еще большие осложнения в процессе разделения этих молекул возникали из-за конденсации фрагментов молекул  $UF_6$  и в объеме, и на охлаждаемых стенках разрядной трубы. В результате было практически невозможно свести баланс по разделяемым веществам, в качестве которых на первых порах использовали смесь гексафторидов урана ( $UF_6$ ) и вольфрама ( $WF_6$ ). Эти явления более подробно описаны в главе 10. Мои попытки минимизировать эти процессы добавлением фтора в зону разряда позволили несколько уменьшить степень разложения  $UF_6$  и других подобных фторидов, но не подавить этот естественный процесс даже в статических условиях, не говоря уже о процессе собственно разделения в бегущей электромагнитной волне, где этот избыточный фтор сепарировался от более тяжелых молекул  $UF_n$ ,  $WF_6$  и их фрагментов. В конце концов работы по плазменному разделению изотопов урана в том виде, как они первоначально проводились, были прекращены, а на основе исследования поведения  $UF_6$  в газоразрядной плазме были разработаны химико-металлургические процессы, представленные в главах этой книги. На результатах исследования поведения гексафторида урана в неравновесной газоразрядной плазме я защитил в 1966 г. кандидатскую диссертацию по химическим наукам.



Развитие этих работ проводилось под общим руководством профессора Н. П. Галкина, который организовал в своем отделе научно-исследовательскую группу, в которую, кроме меня, входили младший научный сотрудник Ю. П. Бутылкин и инженер Б. А. Киселев. С этими сотрудниками я прошел, пожалуй, самый интересный отрезок жизни: с 1966 г. по 1974 г. За указанное время мы, не имея вначале базового образования в области физики плазмы, восполнили этот недостаток регулярным посещением семинаров проф. Л. С. Полака по физике и химии низкотемпературной плазмы; самообразованием, контактами с сотрудниками Института атомной энергии им. И. В. Курчатова и экспериментальной работой, направления которой в общей форме благожелательно контролировались проф. Н. П. Галкиным. Продвижению НИОКР в этой области очень способствовало благожелательное отношение тогдашнего директора ВНИИХТ члена-корреспондента АН СССР А. П. Зефинова к научному поиску и новым научно-техническим разработкам.

В этот период мы исследовали процессы получения оксидов урана из различных солей, имея первоначальной целью заменить традиционные процессы получения оксидов урана процессами плазменными на том основании, что при использовании плазмы в качестве теплоносителя возможно нагреть сырье до очень высоких температур (1000–2500 °С) при сравнительно холодной стенке реактора (100–500 °С). В конце концов мы поняли, что для достижения технического и коммерческого успеха в использовании плазменного состояния вещества в технологии далеко не достаточно замены обычных состояний вещества плазменным состоянием, не достаточно и высоких скоростей химических реакций в плазме, не достаточно и неравновесности. Успех определяется возможностью создать для получения нужного продукта более короткий и безопасный технологический маршрут, минимизировать потери сырья и расход химических реагентов и электроэнергии, минимизировать коррозию оборудования, повысить технологические свойства продукта, снизить металлоемкость оборудования, уменьшить нагрузку на окружающую среду, повысить социальную привлекательность производства и многое другое. Все эти составляющие успеха в освоении плазменной технологии можно в конечном счете оценить в денежном выражении.

На первых порах, в 1966–68 гг. нам очень не хватало работоспособных генераторов плазмы, и мы расширили фронт работы: привлекли к разработке электродуговых плазмотронов Новосибирский институт теплофизики; в области высокочастотных плазмотронов и реакторов прямого индукционного нагрева мы тесно контактировали с Московским энергетическим институтом; в 1970 г. у нас появились первые микроволновые генераторы и плазмотроны, разработанные

НИИ «Титан». С 1966 г. мы опирались в разработке технологического оборудования на Московский НИИХИММАШ, а с 1970 г. к этим работам присоединился конструкторский отдел Сибирского химического комбината, с которым сотрудничество длилось около 20 лет. Мне посчастливилось работать с очень сильными технологами, среди которых особенно запомнились Г. А. Батарев, В. А. Хохлов, В. Д. Сигаило, Ф. С. Бевзюк. Позднее мы организовали группы специалистов в области плазменной и высокочастотной технологии и на других предприятиях, технология на которых контролировалась нашим институтом: на Московском заводе полиметаллов, на Ульбинском металлургическом заводе, на Чепецком механическом заводе, в НПО «Алмаз», в НИИ стабильных изотопов и др. На всех этих предприятиях были созданы сравнительно мощные плазменные установки или установки прямого высокочастотного индукционного нагрева для получения различных материалов для ядерно-энергетического комплекса.

К 1972 г. я закончил несколько работ в области плазменной и высокочастотной технологии применительно к получению оксидов урана из различного сырья и карбидов и защитил докторскую диссертацию по химическим наукам

Все НИОКР по использованию плазменной и частотной техники в химической технологии и металлургии сосредоточились в Отделе электротехнологических процессов ВНИИ химической технологии, который я организовал в 1989 г. Здесь объединились практически все специалисты ВНИИХТ в области плазменной и частотной технологии и металлургии, в основном сравнительно молодые люди в возрасте от 25 до 45 лет. Направления НИОКР затронули большинство стадий ядерного топливного цикла. Наиболее крупномасштабные НИОКР проводили на Сибирском химическом комбинате (СХК), где после завершения стадии НИР строили промышленную установку мощностью 4 МВт по переработке нитратных реэкстрактов регенерированного урана на оксиды урана и азотную кислоту; проводили испытания пилотного завода по переработке отвального по изотопу U-235 гексафторида урана на оксиды урана и фторид водорода, опытно-промышленной установки по переработке выхлопов фтористоводородного производства, содержащих фторид кремния, на оксид кремния и плавиковую кислоту. Поскольку плазменные технологии являются технологиями физическими и маловосприимчивы к типу сырья, мы проводили НИОКР по производству других материалов: оксида магния из растворов нитрата магния, оксидных композиций, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью и многое другое.

На Ульбинском металлургическом заводе мы провели промышленные испытания пилотного завода по получению оксидного ядерного топлива из обогащенного по изотопу U-235 гексафторида урана;

на Чепецком механическом заводе провели испытания плазменного пилотного завода по получению металлического урана из отвального гексафторида урана.

На Московском заводе полиметаллов нами был построен пилотный завод по получению карбида бора с использованием прямого высокочастотного нагрева шихты кислородсодержащего сырья с дисперсным углеродом. Эта работа далее была продолжена в Тбилиси в НИИ стабильных изотопов для производства изотопно-обогащенного карбида бора (обогащенного по В-10), в НПО «Алмаз» и в НПО порошковой металлургии (Минск) — для синтеза карбидов и боридов для инструментального производства,

Во ВНИИХТе и на Новосибирском заводе химконцентратов продвинулись работы и в области плазменной металлургии урана: под руководством к. т. н. А. В. Носикова реализовалась идея радикального сокращения ядерного топливного цикла за счет плазменно-карботермического восстановления урана из оксидного уранового сырья.

Одновременно продвинулись НИОКР в области специальной электрометаллургии циркония на базе технологии «холодного тигля». Эту работу возглавлял д. т. н. Л. И. Качур и к. т. н. В. Т. Готовчиков. Базой для работ служил Приднепровский химический завод, где и была создана крупномасштабная частотная технология производства циркония из фторидного сырья, разработано и создано промышленное оборудование. Аналогичное по принципу действия оборудование разрабатывали на Московском заводе полиметаллов для производства и металлургического аффинажа редкоземельных металлов.

После Чернобыльской катастрофы в 1986 г. и начала горбачевской перестройки наука в СССР перешла на самоокупаемость, однако, в очень уродливой форме. Коммерческий дух проник и на охраняемые территории предприятий Минатомэнергопрома (позднее Минатома) и произвел свою разрушительную работу. Здесь, в предисловии к научно-технической книге, видимо, не место обсуждать эту тему. Стоит лишь сказать, применительно к теме книги, что стройная и довольно эффективная система взаимоотношений науки и промышленности в Минатоме, обеспечившая завоевание этой отрасли передовых позиций в мире и сделавшая ее, несмотря на очевидные недостатки экономической системы в СССР, конкурентноспособной на мировом рынке (эта конкурентноспособность фрагментарно сохраняется и поныне), разрушилась. Прикладная и фундаментальная наука лишилась привычных и объективно значимых ориентиров. Вместо этого в научных лабораториях пыльным цветом расплодилось мелкая коммерция, которая против воли большинства научных сотрудников различного уровня приобрела криминальный оттенок... К сожалению,

это продолжается и поныне, хотя первоначальный научно-технический и интеллектуальный базис истощился или разрушился.

В течение 1992–2002 гг. мне удалось некоторое время поработать на предприятиях атомной индустрии за рубежом, где тоже возникла потребность в модернизации и развитии производства на базе плазменной технологии. В 1992–1994 гг. я работал консультантом Корпорации атомной энергии Южно-Африканской республики, расположенной в Палиндабе — горном анклаве, в 30 км. от столицы ЮАР Претории. В 1994–1997 гг., уже вернувшись в Москву, я продолжал консультировать Technology Development КАЭ ЮАР в области плазменной технологии получения неорганических материалов: удалось выполнить несколько научно-исследовательских работ по экстрактивной металлургии и химической технологии применительно к переработке богатых и очень чистых южно-африканских руд с целью извлечения из них ценных компонентов: фтора в виде фторидов углерода, циркония в виде оксида циркония и пр.

В 1997–1998 гг. мне удалось принять участие в исследовательской работе по получению потоков уран-фторной плазмы на предприятиях BNFL, британской ядерной корпорации, и одновременно читать лекции: в университете Сэлфорд, около Манчестера, на предприятиях BNFL в Кейпенхёрсте, в Спрингфилде, Рисли, Селлафилде. В дальнейшем (в 1998–2003 гг.) эта работа приобрела прикладной характер: были проведены НИОКР по извлечению урана и фтора из потоков уран-фторной плазмы, построен и прошел испытания пилотный завод по переработке отвалного по изотопу U-235 гексафторида урана в компактный уран и фтор.

Распад СССР в 1991 г. и последовавшая за этим повсеместная деградация науки в России и на всем постсоветском пространстве практически остановила развитие прикладных исследований по использованию плазменного состояния вещества в технике и технологии, включая и атомную энергетику. В результате практически повсеместно остановились НИОКР по созданию плазменной техники и развитию плазменной технологии в области получения ядерных и конструкционных материалов, оказались за государственной границей продвинутые плазменные, высокочастотные и низкочастотные технологии производства оксидного ядерного топлива (Казахстан), получения карбидных и боридных материалов (Грузия, Белоруссия), производства циркония и гафния (Украина) и пр. Это негативно отражается на уровне современных международных симпозиумов и конференций по плазменной технологии и металлургии, уровень которых в 1993–2008 гг. заметно снизился. Развитие этих отраслей науки и техники оторвалось от потребностей промышленности, пошло в ширину или по спирали с очень небольшим шагом, перешло в повторение. Многие проблемы, решаемые

в СССР на очень высоком уровне (МГД-генераторы, термоядерный синтез, ядерно-водородная энергетика, транспортные ядерные реакторы на гексафториде урана, фторидная регенерация облученного ядерного топлива, лазерное разделение изотопов и пр.), перестали решаться, в результате чего не замедлил проявиться кризис в решении этих проблем и на мировом уровне, поскольку вклад научных организаций СССР, особенно РФ, в решении этих проблем был ранее очень велик, а иногда был решающим.

За прошедшие семнадцать лет в истории новой России, называемые временем реформ, последние нанесли ее научно-техническому и промышленному потенциалу ущерб, сопоставимый с ущербом от тяжелого военного поражения. Крупномасштабные научные исследования остановлены практически во всех областях. Особенно это касается областей, относящихся к военно-промышленному комплексу. На большинстве промышленных предприятий России производственные фонды изношены, и проблему их замены можно решить на основе научно-технических разработок, многие из которых завершены к началу 90-х годов прошедшего столетия и остались невостребованными после начала горбачевской перестройки. Речь идет, главным образом, о разработках предприятий военно-промышленного комплекса СССР. С моей точки зрения выход из положения возможен только за счет приоритетного развития отраслей техники и технологии, которые и до начала кризиса были конкурентно-способными на мировом рынке: ядерная, ракетно-космическая, военная, металлургическая... В настоящее время во всем мире делаются попытки развить нанотехнологические проекты и на их основе радикально преобразовать научно-технический фундамент науки [11]. Высказывается точка зрения, что физика, химия, биология и прочие науки соединятся на общем научно-техническом фундаменте, поскольку при переходе в область нанотехнологии исходный материал для синтеза компонентов элементной базы и готовых изделий один и тот же и в самих технологиях синтеза не будет качественных различий. Это соединение прогнозируется не только на фундаменты наук, но и на их приложения, как это уже было, когда все науки были подразделами натурфилософии. Ожидания нового технологического и социального прорыва очень велики. В частности утверждается, что нанотехнологический проект равнозначен и даже превосходит атомный проект. Однако при всем многообразии его приложений атомный проект был первоначально сконцентрирован на решении двух основных проблем:

- получение изотопов урана U-235, U-233 и плутония, особенно изотопа Pu-239, главным образом, для военных и позднее для энергетических приложений;
- термоядерного синтеза для тех же приложений.

Из этих проблем полностью решена первая, хотя и она находится в постоянном развитии. Вторая проблема решена применительно к военным приложениям, но развивается и энергетическое направление.

Нанотехнологический проект в отличие от атомного проекта не сконцентрирован на определенных точках прорыва, как уран, плутоний и синтез легких ядер, поэтому трудно определить, когда по мере количественных накоплений наступит новое качество. При выполнении некоторых нанотехнологических проектов новое качество просматривается уже сейчас. Некоторые из этих проектов, находящиеся в состоянии развития, рассмотрены ниже в одной из глав монографии.

### Список литературы

1. Панарин А. С. Духовные катастрофы нашей эпохи в свете современного философского знания. Журнал «Москва», 2004, № 3, с. 146–162.
2. Солонин М. И. Состояние и перспективы развития ядерного топливного цикла мировой и российской ядерной энергетики. Атомная энергия, 2005, т. 98, выпуск 6, с. 448–459.
3. Месяц Г. А., Прохоров М. Д.. Водородная энергетика и топливные элементы. Вестник РАН, 2004, т. 74, № 7, с. 579–597.
4. Коротеев А. С., Смоляров В. А. Автомобиль на водороде: проблемы и решения. Атомная энергия, 2004, т. 97, выпуск 5, с. 380–387.
5. Пономарев–Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика. Атомная энергия, 2004, т. 96, выпуск 6, с. 411–425.
6. Euroatom/UKAEA Association: Fusion Research, 2003–2004 Progress Report. Culham, Oxfordshire, UK, June 2004.
7. Легасов В. А., Кузьмин И. И. Проблемы энергетики. Природа, 1981, № 2 (786), с. 8–23.
8. Арутюнов В. С., Лapidус Ф. Л. Роль газохимии в мировой энергетике. Вестник РАН, 2005, т. 75, № 8, с. 683–693.
9. Туманов Ю. Н. Плазменные технологии в формировании нового облика промышленного производства. Вестник РАН, 2006, т. 76, № 6, с. 491–502.
10. Toumanov I. N. Plasma and High Frequency Processes for Obtaining and Processing Materials in the Nuclear Fuel Cycle. The second edition, reprocessed, supplemented. N.-Y. Nova Science Publishers, 2008, 660 pp.
11. Ю.Альтман. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений, 2006.

## Глава 1

# РОЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РЕШЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

### § 1.1. Введение

Из событий последнего столетия и прошедших лет нового столетия следует особо выделить четыре замечательных достижения, которые умножили природные способности человека в миллионы и даже в миллиарды раз:

- открытие ядерной энергии и разработка технологии использования внутренней энергии атома в различных приложениях применительно и к делению ядер урана и трансурановых элементов, и к синтезу ядер легких химических элементов;
- создание технологии и техники для преодоления земного тяготения, выход в космическое пространство и постепенное освоение последнего;
- разработка полупроводниковой технологии, сделавшей возможным производство сначала транзисторов, затем интегральных схем (если механические счетные машины начала века могли выполнить несколько вычислительных операций в секунду, то современные компьютеры считают в миллиарды раз быстрее);
- разработка генной технологии (пока не очень понятно, какой конечный продукт целесообразно планировать).

В последние годы возникло еще одно многообещающее направление науки и техники — нанотехнологии.

Все эти достижения явились результатом фундаментальных научных исследований, все они оказали большое влияние на развитие техники и технологии в других областях человеческой деятельности, но, пожалуй, в наибольшей степени это влияние связано с развитием ядерной техники и технологии. Результаты работ в ядерной технике и технологии далеко вышли за рамки прогресса и инноваций в са-

мой ядерной индустрии и прямо или опосредствованно используются во многих других областях техники, включая и вышеперечисленные открытия. К конкретным примерам такого использования мы вернемся ниже, сейчас же отметим в общем виде влияние развития ядерной техники и технологии на развитие человеческого сообщества.

### **§ 1.2. Междисциплинарность**

Развитие ядерной энергетики поставило качественно новые задачи практически во всех областях человеческой деятельности, причем не только поставило, но и способствовало их решению. Это касается машиностроения, судостроения, электротехники, материаловедения, химии, физики, биологии, внутригосударственного и межгосударственного регулирования, систем контроля. Возникли не известные ранее комплексные проблемы, затрагивающие многие отрасли знаний и фокусирующиеся на определенной тематике. Для решения таких проблем необходимо сотрудничество государства, науки и промышленности. Возникла необходимость формулировать кратко-, средне- и долгосрочные цели и программы, которые способны давать нужную ориентацию работам во всех имеющих отношение к делу областях.

### **§ 1.3. Культура безопасности**

Ядерная энергетика — это первая технология, которая развивалась не по принципу проб и ошибок. Это, разумеется, не означает, что ошибок не было и не будет впредь. Однако большой потенциал риска этой технологии с самого начала обусловил необходимость мер безопасности, которые также разрабатывались на основе результатов фундаментальных исследований. В ядерной энергетике и технологии разработаны принципы, системы и технические средства обеспечения внутренней безопасности, которые сами по себе обусловили высокий уровень развития ядерной техники. Эти принципы можно и дальше изучать и совершенствовать на основе вероятностного анализа безопасности в поисках слабых мест. Имеется очевидная необходимость внедрения разработанных в ядерной индустрии принципов безопасности и технических средств в другие области техники, где высокая мощность сочетается с риском. Это тем более необходимо, что выход радиоактивности в окружающую среду не обязательно связан с работой ядерных установок. Хорошо известно, что и теплоэлектростанции, работающие на органическом топливе, также выбрасывают в окружающую среду радиоактивные газы и аэрозоли в немалом количестве.



## § 1.4. Новые технологии

Новые технологии — это наиболее широкая область, в которой повсеместное влияние ядерной технологии прослеживается наиболее широко. Многие технологии являются или составной частью развития ядерной техники, или были привнесены туда извне и уже там получили мощное развитие и видоизменение. Отметим в общем виде, в качестве примеров, некоторые из них.

**1.4.1. Исследование воздействия на биосферу.** Еще в 60-х годах в связи с негативным воздействием на окружающую среду применением ядерной энергии в военных целях и первых инцидентов на предприятиях ядерной индустрии были созданы модели распространения в атмосфере веществ-загрязнителей и их трансформации. Эти модели далее развивались и усложнялись на случай аварий с высвобождением радиоактивных материалов. Далее эти модели модифицировались применительно и к другим источникам техногенного воздействия на биосферу, например: автомобильного транспорта — на атмосферу, фреонов — на озоновый пояс Земли, побочных продуктов органического синтеза (оксинов и фуранов) — на пригодность биосферы для проживания и т. п.

**1.4.2. Защита окружающей среды.** В связи с развитием технологии и техники обогащения урана изотопом U-235 и созданием сердечников тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) получила мощное развитие порошковая металлургия, с применением которой созданы разнообразные керамические и металлокерамические фильтрующие материалы. Их назначением является тонкая и ультратонкая очистка воздуха и технологических газов от дисперсных и ультрадисперсных примесей. Сфера применения этих материалов и изделий очень широка: улавливание радиоактивных и просто токсичных аэрозолей на предприятиях атомно-энергетической промышленности, ультратонкая очистка воздуха и технологических сред на предприятиях микроэлектронной промышленности, где требуемый уровень чистоты материалов превосходит уровень чистоты материалов в ядерной технологии, очистка выхлопных газов на предприятиях цветной металлургии и т. п. На предприятиях ядерно-энергетического комплекса разработана технология производства многослойных металлокерамических фильтров, позволяющих улавливать ультратонкие аэрозоли, и технология их регенерации. Такими фильтрами оснащаются производства ультрачистых веществ и материалов.

**1.4.3. Манипулирование инструментом.** Технология и техника работы с радиоактивными веществами и материалами в «горячей камере» с помощью манипуляторов не только применяется прямо для рабо-

ты с сильно токсичными веществами в сложных условиях, но и явилась прототипом технологии и техники проведения хирургических операций с минимальным вмешательством в организм [1]. Хирург получает много степеней свободы в определенных безопасных пределах: хороший трехмерный обзор операционного поля, подпитанные энергией инструменты и пр. В этом же плане обсуждается внедрение в медицинскую практику технологии, разработанной применительно к операциям обслуживания ядерной техники и основанной на имитации процессов. Примером служит подготовка к обслуживанию манипуляторов для крупных экспериментов в ядерной технологии или в управляемом термоядерном синтезе.

**1.4.4. Ультразвуковые испытания.** Метод ультразвуковых испытаний и проверки трубопроводов и других ответственных элементов оборудования предприятий ядерной индустрии нашел широкое применение для испытаний нефте- и газопроводов. О важности этой проблемы известно всем: разрывы газо- и нефтепроводных магистралей приводят к масштабным катастрофам и экологическим бедствиям.

**1.4.5. Liga-технология [1].** На основе разработки технологии обогащения урана с помощью разделительных сопел создана технология рентгенолитографии с гальванизацией и формованием (Liga-технология), которая позволяет изготавливать трехмерные структуры в микрометровой области. Первый рыночный продукт этой технологии — фокусируемый оптический спектрометр размером с ноготь; его фокусирующая решетка обнаруживает градации в 0,2 микрона. Первоначальное применение этот прибор нашел в системах контроля окрашивания; в будущем он обещает быть ключевым элементом сложных микросистем, где окраска жидкостей и газов контролируются сенсором, и имеет большой потенциал в области контроля и управления технологическими процессами.

**1.4.6. Применения в медицине [1].** Важная область применения микротехники — медицина, где человеческая жизнь зависит от работоспособности техники, а требования по безопасности сравнимы с требованиями в ядерной технологии. Один из примеров такой микротехники — микронасосы, при конструировании которых применен действующий в ядерных реакторах принцип четырехкратной избыточности.

В медицине нашел применение расчетный метод ядерной технологии для расчета и имитации динамических нагрузок на ответственные органы. С помощью этого метода определяют надежность имплантатов в тазобедренный сустав.

В медицине нашли применение радиоактивно дотированные расширители. В радиобиологии накоплено много материала о воздействии

радиоактивных материалов на биологические ткани. Эти знания используются для тонкой медицинской диагностики и терапии. Один из современных примеров — разработка расширителей из тонкой проволочной сетки, которые должны препятствовать сужению кровеносных сосудов. Вращение этих расширителей в ткани могло бы свести на нет требуемый эффект. Чтобы этого не происходило, расширители дотируются  $\beta$ -эмитером (P-32). Проводятся клинические испытания этих расширителей.

**1.4.7. Сверхпроводящие материалы.** Научные и технические данные, полученные при разработке больших магнитов в управляемом термоядерном синтезе (УТС), нашли применение при разработке ЯМР-спектрометров (ЯМР-ядерный магнитный резонанс) с высоким разрешением. Эти же материалы закладываются в современные и будущие конструкции генераторов и моторов, поездов на «магнитной подушке», аккумуляторов электроэнергии, компьютеров на сверхпроводниках и т.п. Не случайно предприятия атомно-энергетического комплекса внесли очень большой вклад в исследование и разработку высокотемпературных керамических сверхпроводников и их практическое применение в многочисленных областях народного хозяйства.

**1.4.8. Высокотемпературные металлические, керамические и композиционные материалы.** Развитие ядерной индустрии привело к созданию многочисленных групп так называемых специальных сталей, способных выдерживать высокие температуры и высокий уровень радиоактивного излучения, сопряженных с действием коррозионно-активных сред (включая расплавленные металлы, среды, содержащие в различных сочетаниях фтор, азотную и серную кислоты, щелочи и т.п.). Эти стали даже с учетом их стоимости создают новое качество в оборудовании для химико-металлургических процессов, не обязательно относящихся к ядерно-энергетическому комплексу.

В ядерной промышленности созданы новые неметаллические материалы на основе чистого и модифицированного графита, карбида и нитрида бора, оксида бериллия, на которые большой спрос в различных областях техники. Это относится к композиционным материалам, применение которых значительно расширяет возможности различных технологий не только в ядерной и космической промышленности, но и в транспорте, и других отраслях народного хозяйства. Так, технология изготовления сферических твэлов с разнообразными покрытиями использована при разработке материалов для высокотемпературных топливных элементов для нужд транспорта, преобразующих энергию водородного и углеводородного топлива в электроэнергию.

**1.4.9. Другие неядерные применения ядерной техники и технологии.** Перечисление примеров влияния ядерной техники и тех-

нологии на смежные и удаленные области науки и техники, видимо, бесконечно. В заключение этого по необходимости краткого и, по-видимому, вкусового перечисления отметим многообещающий метод автоматической оценки образа, разработанный в ядерной энергетике для определения количественных результатов контроля облученных твэлов, в частности контроля пористости твэлов реакторов-бридеров после сильного облучения. В настоящее время эта технология применяется [1] на упаковочных линиях для неразрушающего контроля других видов топлива и для получения других материалов и изделий.

Сейчас ядерная технология интегрирована в существующую систему высоких технологий. Она предъявляет адекватные требования к используемым в ней технологиям из других отраслей техники и открывает путь для применения своих технологий в неядерных секторах технологии, являясь, таким образом, интегрирующим элементом современного мира высоких технологий не только в силу своей энергопроизводительности: щадящим окружающую среду, не зависящим от климатических условий, экономически выгодным источником энергии.

**1.4.10. Новые приложения ядерной техники в управляемом термоядерном синтезе.** В настоящее время во ВНИИ ядерной физики РФ ведутся работы по прямому преобразованию энергии ядерных реакций в лазерное излучение оптического диапазона [2]. Задача инерционного термоядерного синтеза решается на установке «Искра-5» с применением 12-канального лазера с суммарной мощностью излучения 30 кДж и длительностью импульса 0,3 нс. Оптические зеркала направляют 12 лазерных лучей на мишень диаметром 2 мм; лазерное излучение трансформируется в рентгеновское излучение, которое обеспечивает 3000-кратное сжатие сферической мишени диаметром 0,03 мм, содержащей дейтерий-третиевую смесь. При этом радиус мишени уменьшается в 14 раз. В настоящее время создается установка «Искра-6», мощность которой в 10 раз превышает мощность установки «Искра-5».

**1.4.11. Развитие технологии получения и регенерации ядерного топливного цикла.** Вопросы, относящиеся к развитию технологии получения и регенерации ядерного топлива и к дальнейшему совершенствованию ядерного топливного цикла, представляются исключительно важными и для конечной стоимости электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, и для безопасности, и для дальнейшей социальной адаптации ядерной энергетики, и т.п. На развитие этих технологий большое влияние оказывают смежные области техники и технологии:

- химико-синтетическая промышленность, выпускающая высокоэффективные органические сорбенты, экстрагенты, их разбавите-

- ли, мембраны для сепарации и тонкой очистки ядерных материалов в гидрометаллургических производствах ядерной индустрии;
- электротехническая промышленность, выпускающая новые генераторы электроэнергии с более высоким, чем ранее, коэффициентом полезного действия (КПД), специально адаптированные к потребностям химико-металлургических производств: преобразователи электрического тока и напряжения, низкочастотные, высокочастотные и микроволновые генераторы, достаточно мощные лазеры для прецизионной обработки материалов и разделения изотопов;
  - микроэлектронная промышленность, создавшая технику для контроля, управления процессами ядерной индустрии.

### § 1.5. Структура мировой энергетики

В большинстве крупных промышленно развитых стран энергетика многоукладна: электроэнергия генерируется на тепловых электростанциях (ТЭС), работающих на углеводородном сырье (уголь, нефть, природный газ), на атомных электростанциях (АЭС), на гидростанциях (ГЭС), а также на так называемых возобновляемых источниках энергии, часто именуемых в последнее время альтернативной энергетикой (солнечная и геотермальная энергия, энергия ветра, приливов и отливов и пр.). В качестве примера посмотрим на структуру энергетики самой развитой в промышленном отношении страны — США: на рис. 1.1 показана доля различных источников энергии, из которых складывалась энергетика США сравнительно недавно, в 2003 г. Отсюда видно, что 86 % энергии генерируется на ТЭС, работающих на нефти, угле и природном газе, 8 % — на АЭС, 3 % — на ГЭС, только 1 % составляют альтернативные источники энергии. Во всем, что касается углеводородной энергетики, могут произойти в ближайшие десятилетия структурные изменения, связанные с возможным снижением объемов добычи нефти большинством ведущих мировых производителей. Утверждение о наличии значительных ресурсов относительно труднодоступных и нетрадиционных источников жидких углеводородов, как правило, не акцентируют внимание на том, что постоянное увеличение их доли в общем объеме добычи — причина роста производственных затрат. Возможность поддержания уровня добычи за счет более широкого вовлечения таких источников в разработку при экономически приемлемых затратах весьма проблематична, поскольку за последние 30 лет прирост объема мировой добычи нефти в 1,6 раз потребовал увеличения производственных затрат в 16 раз, что стало главным фактором постоянного увеличения стоимости нефти [3].



Рис. 1.1. Вклад различных источников энергии в энергетику США в 2003 г. [3]

Газообразный углеводородный энергоноситель — природный газ появился на арене мировой энергетики относительно недавно. Его доказанные мировые запасы велики, постоянно пересматриваются в сторону увеличения и сосредоточены в двух основных регионах — в России и на Ближнем Востоке [3]. Обладая 12,8 % территории и 2,8 % населения, Россия имеет более 40 % потенциальных запасов природного газа (мировые достоверные ресурсы — 155 трлн. м<sup>3</sup>, прогнозируемые — 280 трлн. м<sup>3</sup>). Столь же велики в России нетрадиционные запасы природного газа, например угольного метана (280 трлн. м<sup>3</sup>), добыча которого в США достигла 35 млрд. м<sup>3</sup>/год. Согласно современным представлениям о генезисе природный газ в отличие от угля и нефти имеет в основном абиогенное происхождение. Ежегодно в результате дегазации планеты до 1 трлн. м<sup>3</sup> метана выделяется из недр в земную кору и в атмосферу [3]. Это количество сопоставимо с его мировой годовой добычей (2,5 трлн. м<sup>3</sup>), что позволяет рассматривать природный газ, как частично возобновляемый ресурс. Кроме того существуют огромные запасы метана в виде твердых газовых гидратов. Они составляют около 20000 трлн. м<sup>3</sup> [4–5], то есть на два порядка превышают традиционные запасы метана. В гидратах один объем воды связывает от 70 до 210 объемов газа, а в 1 м<sup>3</sup> гидрата метана содержится до 1165 м<sup>3</sup> газа при нормальных условиях. Таким образом, по запасам, экономичности добычи и экологическим характеристикам природный

газ — самый перспективный ресурс, способный обеспечить потребности человечества в энергии и углеводородном сырье, по крайней мере, в течение текущего столетия.

Источником оптимизма по поводу перспектив мировой энергетики стали надежды на альтернативные или возобновляемые источники энергии. К сожалению, оценки доказывают нереальность этих надежд. Все возобновляемые источники энергии, будь то солнечная, ветровая, гидроэнергетика, энергия, получаемая за счет сжигания биомассы, имеют первичным источником солнечное излучение. Сейчас уровень мирового энергопотребления составляет почти 0,02 % от энергии падающей на Землю солнечной радиации. По прогнозам, в текущем столетии он увеличится еще в несколько раз, в основном за счет роста энергопотребления в развивающихся странах, и превысит 0,1 % от поступающей на планету солнечной энергии. Согласно оценкам человечество не нарушает равновесия биосферы до тех пор, пока оно поглощает менее 1 % от первичной продукции биоты. Так как КПД преобразования солнечной энергии зелеными растениями составляет в среднем немногим более 1 %, то (с учетом потерь) даже использование всей продукции биосферы не сможет покрыть энергетические потребности человечества. Низкая плотность потока солнечной радиации на земную поверхность и маленький КПД преобразования этой энергии растениями перечеркивают надежды на глобальную роль возобновляемой энергетики.

Еще менее реально создание искусственных фотопреобразующих систем с промышленными мощностями. Из-за низкой плотности потока первичной энергии для реализации подобных мощностей необходимо изъять из хозяйственной деятельности или естественных экосистем огромные площади в сотни тысяч квадратных километров, что соответствует территории крупнейших западноевропейских государств, и вложить громадные инвестиции в оснащение соответствующим оборудованием. Солнечная энергия остается одним из самых дорогих источников и дает менее 0,1 % в энергобаланс передовой в этом отношении страны — США.

Тезис об экологической чистоте возобновляемых источников энергии также вызывает большие сомнения. Как правило, не учитывается эмиссия отходов, образующаяся при производстве, эксплуатации и утилизации огромного и быстро выходящего из строя парка оборудования, и объем сжигаемого для этих целей топлива. Например: при существующих промышленных технологиях получения водорода цикл от производства сырья и энергии для его выделения до конечного применения на автотранспорте создает самый высокий уровень эмиссии вредных веществ по сравнению со всеми другими видами топлива [3].

Результаты моделирования глобальных процессов развития цивилизации показывают [3], что при современном уровне энергопотребления развитых стран за счет возобновляемых источников энергии может проживать не более 500 млн. человек, что в 10 раз ниже существующей численности населения. Люди живут за счет своеобразных «энергетических консервов» (в основном нефти и угля), которые приготовила биосфера примерно за 300 млн. лет своей эволюции. Эти ресурсы громадны, но скорость их потребления почти в миллион раз превышает скорость процессов их естественного формирования. С учетом темпов роста мирового энергопотребления такие запасы могут обеспечить потребности человечества максимум в течение пары сотен лет.

В принципе, в выводах относительно альтернативной энергетики в работе [3] нет ничего нового. Еще в 1981 г. В. А. Легасов и И. И. Кузьмин [6] провели анализ технических возможностей возобновляемых источников энергии на основе выводов Международного энергетического конгресса МИРЭК-10 и выяснили, что они намного меньше глобальных потребностей энергии на перспективу. Некоторое исключение могли бы составить геотермальная энергетика, энергетика, использующая разность температур поверхностных и глубинных слоев морей и океанов, солнечная энергетика. В основе проведенного анализа — т. н. энергетический эквивалент:  $Q = 1,055 \cdot 10^{18}$  кДж =  $2,93 \times 10^{14}$  кВт · ч =  $3,35 \cdot 10^7$  МВт · г.

В ходе анализа авторы [6] определили технический потенциал геотермальной энергии. Он составляет  $Q/\text{год}$ . Использование тепла морей и океанов может дать  $2Q/\text{год}$ . Однако реализовать этот потенциал практически невозможно, а фактическая мощность этих двух источников в сотни раз меньше. Общее количество солнечной энергии, проходящей атмосферу и достигающей поверхности Земли, оценивается в  $2000Q/\text{год}$ . Однако реализовать эти ресурсы очень трудно из-за низкой интенсивности солнечного излучения и большого расхода материальных и земельных ресурсов. Для производства 1 МВт·г электроэнергии в солнечной энергетике требуется затратить  $10^4$ – $4 \cdot 10^4$  чел·час, а в традиционной энергетике на органическом топливе этот показатель составляет 200–500 чел·час. Детальный анализ всех подпадающих учету факторов позволил экспертам МИРЭК-10 и авторам [6] сделать вывод, что к 2020 г. потенциально возможная доля возобновляемых источников энергии в мировом энергопотреблении может составить не более 13 %.

В то же время запасы ископаемых источников энергии, включая разведанные, вероятные и возможные запасы, составляют: уголь —  $120$ – $240 Q$ ; нефть —  $25$ – $32 Q$ ; газ — примерно  $14,5 Q$ ; уран в реакторах на тепловых нейтронах —  $3,7 Q$ ; уран в реакторах-размножителях, в зависимости от стоимости извлечения урана от 130 до 295 долл/кг



40–25 000  $Q$ . При этом в океане содержание урана — примерно  $3,4 \cdot 10^5 Q$ ; в земной коре на глубине до 0,5 км —  $6,7 \cdot 10^5 Q$ .

Альтернатива углеводородной энергетике хорошо известна — это ядерная энергетика, а в отдаленной перспективе — практически неиссякаемый источник энергии: управляемый термоядерный синтез. Текущая и перспективная роль ядерной энергетике в мировом энергообеспечении рассмотрена в следующем разделе. Программа практического освоения термоядерной энергии рассчитана на несколько десятилетий: примерно через 30 лет планируется выполнение международных программ ITER and IFMIF, имеющих целью создание и запуск демонстрационного термоядерного реактора [7].

Поскольку в оценках будущей структуры мировой энергетики замечен известный скептицизм относительно перспектив энергообеспечения за счет управляемого термоядерного синтеза, следует сделать несколько замечаний по этому поводу. Дело в том, что термоядерный синтез легких элементов имеет место в природе: протекает на звездах в естественных условиях, где обеспечивает выделение энергии. На звездах термоядерное топливо удерживается силами гравитации, однако, гравитация достаточна для такого удержания только в очень массивных системах, таких как звезды. Поэтому для воспроизведения этого процесса в земных условиях необходимо использовать магнитные поля, позволяющие удерживать друг около друга ядра тяжелых изотопов водорода, дейтерия (D) и трития (T), и осуществить синтез ядер гелия (рис. 1.2). Для этого необходимо нагреть (D–T)-плазму (полностью ионизованный газ) до температуры около 100 миллионов градусов Цельсия. Термоядерный синтез может обеспечить источником энергии с почти неограниченными и безопасными запасами топлива, причем синтез протекает в устройствах, которые характеризуются исключительно низкими уровнями запасенной и потенциальной энергии, так что эти устройства работают относительно безопасно.

Сырьем, необходимым для термоядерного синтеза, является дейтерий, который продуцируют из воды, и литий — легкий металл из группы щелочных металлов. Для выработки 200 000 кВт·ч электроэнергии необходимо ничтожное по массе количество сырья. Для генерирования этой электроэнергии на угольной ТЭС потребовалось бы 40 т угля. К сказанному следует добавить, что при термоядерных реакциях не производятся парниковые газы, как это имеет место на ТЭС, и качественно снижаются проблемы отходов, таких, как в атомной энергетике.

Европейская программа исследований по магнитному удержанию термоядерной плазмы, осуществляемая в рамках соглашения the European Fusion Development Agreement (EFDA), основана на использовании токамака, в котором удерживающее магнитное поле генерируется

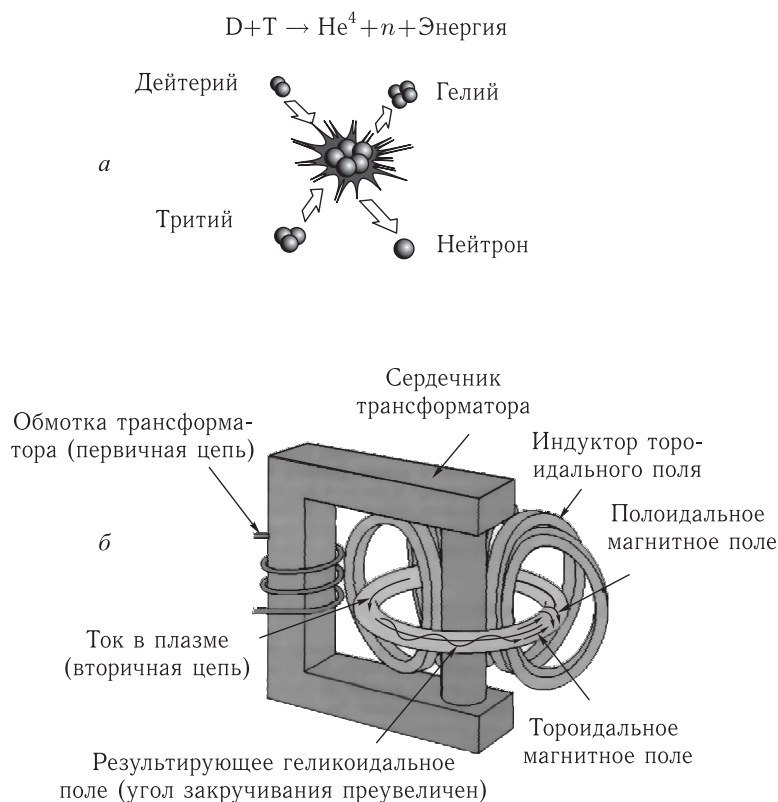


Рис. 1.2. Схемы дейтерий–тритий термоядерной реакции (*a*) и токамака для магнитного удержания термоядерной плазмы (*б*)

электрическими токами, протекающими в обеих внешних катушках и в самой плазме (рис. 1.2). Хорошо известные термоядерные реакторы JET и ITER являются токамаками. Реактор ITER предназначен для демонстрации процессов, протекающих на термоядерной электростанции, и отработки требуемой технологии. На рис. 1.3 показано, как выглядит в общем плане термоядерный реактор ITER. Размеры реактора оцениваются из сравнения с фигурой человека около основания реактора [7].

В настоящее время демонстрационный термоядерный реактор ITER строится в Кадараше (Франция) [7]. Параллельно с проектом ITER должен быть осуществлен проект IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), направленный на разработку оборудования для облучения термоядерных материалов. Параллельная реализация проектов ITER и IFMIF должна создать научно-технический и технологический

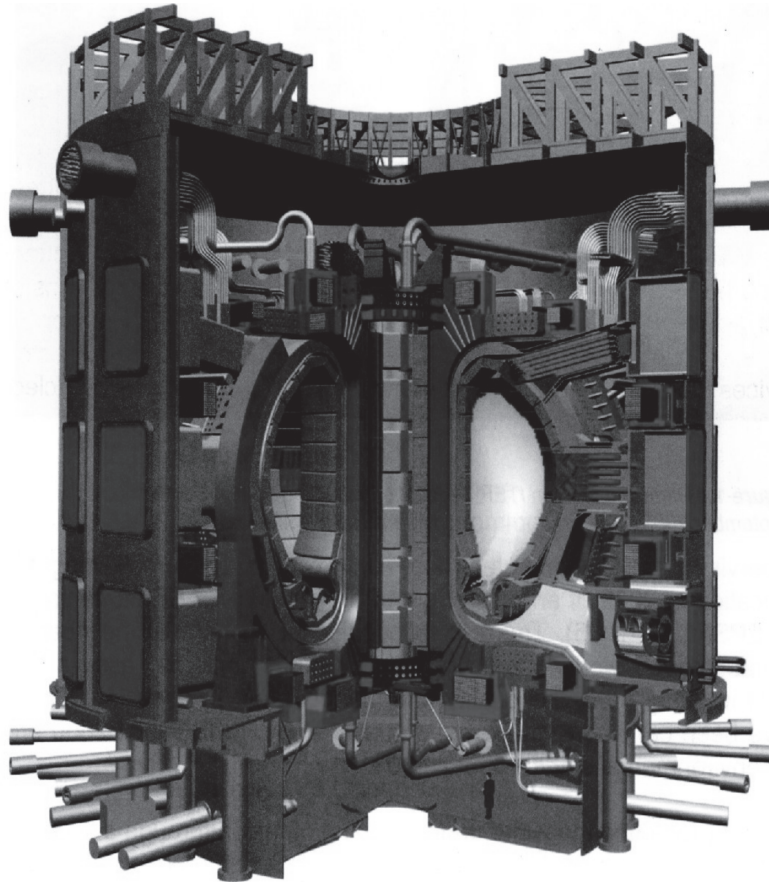


Рис. 1.3. Внешний вид термоядерного реактора ITER; размеры реактора оцениваются из сравнения с фигурой человека около основания реактора [7]

базис для успешной реализации программы создания демонстрационного термоядерного реактора в течение ближайших 30 лет и перехода к созданию промышленного реактора в последующие годы.

### **§ 1.6. Роль ядерной энергетики в мировом энергообеспечении**

Широкое внедрение ядерной энергетики в мировой топливно-энергетический цикл стало уже свершившимся фактом. Для многих стран, где атомные электростанции (АЭС) вносят решающий вклад

в национальную энергетику, где на промышленном уровне налажены производство и регенерация ядерного топлива, система транспортировки и хранения радиоактивных отходов, где проводятся исследования по широкому вовлечению плутония в ядерный топливный цикл, эти события стали, повидимому, уже необратимыми, несмотря на более или менее активные возражения определенной части населения. Одной из таких стран является Франция, в которой прогресс в производстве электроэнергии на АЭС является на редкость впечатляющим: за 25 лет с 1973 года доля ядерного производства электроэнергии увеличилось с 39 % (174 ТВт·ч) до 78 % (451 ТВт·ч). Эволюция перестройки энергетики во Франции приведена на рис. 1.4 как пример радикальной перестройки на ядерную энергетику, экономический потенциал которой имеет ясную стратегическую перспективу.

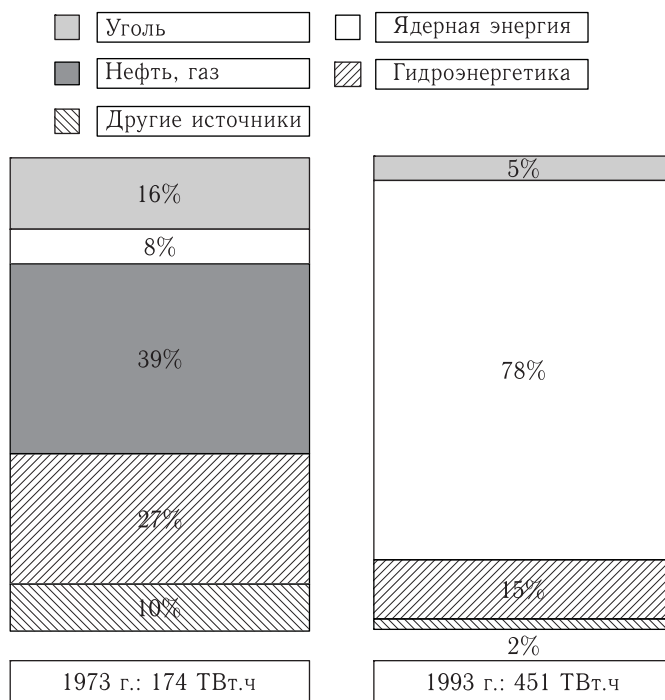


Рис. 1.4. Производство электроэнергии во Франции по видам энергоносителей в 1973 г. и 1993 г. [8–10]

Научно-технический прогресс в ядерно-энергетической промышленности способствовал превращению атомной энергетики в одну из ведущих отраслей мировой энергетики наряду с гидроэлектростанциями, тепловыми электростанциями (ТЭС), работающими на угле, мазуте,

природном газе. К 1998 году выработка электроэнергии на АЭС составляла уже свыше 17 % всей мировой выработки мира: к тому времени 424 действующих во всем мире атомных реакторов (энергоблоков) в разных странах имели суммарную электрическую мощность 338 441 мегаватт (табл. 1.1).

На сегодняшний день ядерная энергетика в основном базируется на реакторах на тепловых нейтронах и на урановом ядерном топливе; подавляющее число АЭС работают на оксидном ядерном топливе, ядерный цикл, естественно, пока не замкнут, хотя некоторые АЭС уже работают на смешанном уран-плутониевом топливе (т. н. МОХ-топливо).

С 1998 г., когда была составлена табл. 1.1, появились некоторые изменения в приведенных в ней данных, но они не слишком существенны. Так, Игналинская АЭС в Литве находится в стадии постепенного закрытия, в Германии выводится из эксплуатации, по крайней мере, одна из АЭС. Вместе с тем в Финляндии строится пятый ядерный реактор типа ВВР (Boiling Water Reactor) электрической мощностью 1600 МВт, после чего доля атомной энергетики в этой стране достигнет 35 % [11]. По тем же данным 2004 г. [11] в мире ведется разработка проектов 32 АЭС, большинство из которых приходится на Индию и Китай. Строятся 4 ядерных реактора типа ВВР в Южной Корее, электрическая мощность каждого из которых составляет 1000 МВт. В 2010 году планируется ввести в эксплуатацию реактор ВВЭР-1000 на АЭС в Бушире (Иран).

Принципиальная схема ядерного топливного цикла, ориентированного на использование в качестве ядерного топлива металлического урана, диоксида урана или смесового оксидного уран-плутониевого топлива, выглядит более или менее типовой (рис. 1.5), несмотря на ряд принципиальных различий, обусловленных различиями в аппаратурном оформлении при переделах в процессе производства и регенерации топлива, типом ядерного энергетического оборудования и соответственно некоторыми физико-химическими свойствами промежуточных или конечных продуктов. Однако в большинстве стран, обладающих АЭС и более или менее продвинутым ядерно-энергетическим комплексом, проводятся научно-исследовательские (НИР) и опытно-конструкторские (ОКР) работы по совершенствованию и созданию нового ядерно-энергетического оборудования, по получению новых видов ядерного топлива, по технологии его производства и переработки после извлечения из ядерного реактора, технологии хранения и обработки радиоактивных отходов и т. п.

Для проведения таких НИОКР есть достаточно как внутренних, так и внешних оснований. Дело в том, что развитие даже разомкнутого ядерно-топливного цикла далеко не окончено. Предстоит коммерческое внедрение реакторов на быстрых нейтронах, производство и приме-

Таблица 1.1. Мировая статистика в области ядерной энергетики  
(положение в 1997 г. по данным обзоров и рекламных материалов [8–10])

Страна	Количество ядерных реакторов	Суммарная электрическая мощность АЭС, МВт
США	109	99 152
Франция	55	60 880
Япония	44	32 238
Германия	25	22 149
Россия	29	21 242
Канада	21	14 874
Великобритания	34	13 820
Украина	14	12 818
Швеция	12	10 452
Испания	9	7 572
Южная Корея	9	7 220
Бельгия	7	5 807
Тайвань	6	4 890
Болгария	6	3 760
Литва	2	3 000
Швейцария	5	2 952
Финляндия	4	2 400
ЮАР	2	1 842
Чехия	4	1 782
Индия	8	1 707
Венгрия	4	1 645
Словакия	4	1 632
Аргентина	2	935
Румыния	1	700
Словения	1	664
Мексика	1	654

Таблица 1.1. Продолжение

Бразилия	1	626
Голландия	2	480
Китай	1	288
Казахстан	1	135
Пакистан	1	125
Всего в мире	424	338 441

ние плутония, не говоря уже о текущих задачах по созданию более прогрессивных видов ядерного топлива, по рециклу ядерных компонентов, по развитию технологии переработки радиоактивных отходов и о многом другом. В принципе, не окончен и принципиальный спор о том, как должна развиваться мировая энергетика вообще: на углеводородном или ядерном топливе; каков должен быть вклад возобновляемых источников энергии: энергии солнца, энергии приливов и отливов, энергии ветра, геотермальной энергии. Обилие противоречащих друг другу точек зрения, разноречивой и подчас несовместимой информации и аргументации, часто тенденциозной и отвечающей интересам крупных международных или национальных финансовых групп, возможность формирования в заданном духе общественного мнения через средства массовой информации — все это не способствует выработке не только стратегических, но иногда и тактических концепций в проведении научно-технической политики и объективно-правильному воспитанию населения. На сегодняшний день еще не исчерпаны мировые запасы жидкого и газообразного углеводородного топлива, кроме того, существующая в мире транспортная инфраструктура еще более или менее справляется с перевозками твердого углеводородного топлива (главным образом, каменный уголь). Не для всех еще ясны экологические последствия развития энергетики на ТЭС. Эта неопределенность подпитывается тем, что пока еще ядерная технология дает сбои в виде нечастых аварий и штатных ситуаций на АЭС и других предприятиях ядерно-топливного цикла, пока еще нельзя сказать, что в странах с ядерной технологией флора и фауна не испытывают дополнительной нагрузки от появления радиоактивных изотопов. Именно поэтому спор на уровне zaangażированной прессы или популярной литературы не окончится ни в глобальном, ни в региональном масштабах. Однако, когда обсуждение ведется на уровне специалистов, говорящих на понятном для них языке с привлечением экономических расчетов, с учетом сегодняшних и будущих потребностей, экологических и социальных последствий развития энергетики и т. п., становится очевидным, что

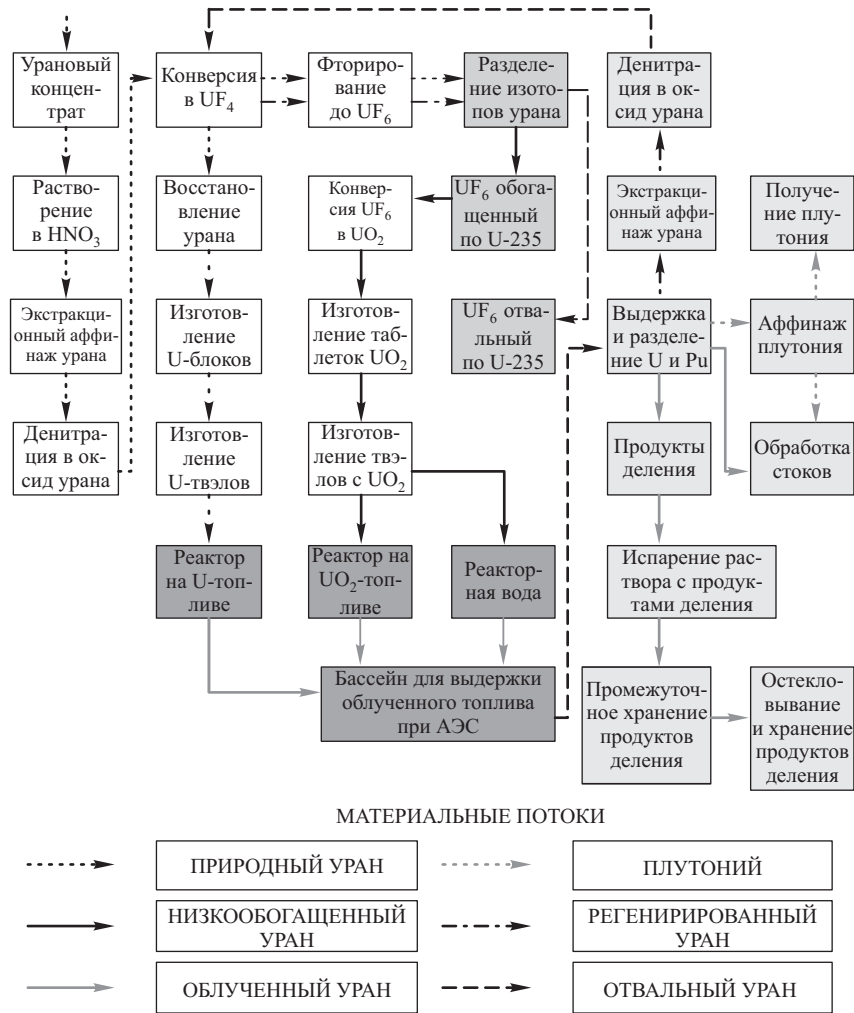


Рис. 1.5. Принципиальная схема частично замкнутого ядерного топливного цикла

атомной энергетике в видимой перспективе нет альтернативы и что обсуждать следует, по-настоящему, проблемы дальнейшего удешевления, безопасности или стоимости ядерной энергетики.

В принципе, и безопасность, и стоимость атомной энергетики определяются совершенством конструкции, эффективностью работы и безопасностью ядерных реакторов и эффективностью, стоимостью и без-