



Ю.А. Колесников, А.А. Власов*, Е.И. Козлова, А.А. Котов

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований
142190, г. Троицк московской обл., факс (095) 334 5660 e-mail: kolesnik@triniti.ru

*Министерство Российской Федерации по атомной энергии
101000, Москва, Главпочтамт, а/я 911, факс (095) 239 4641

I. Введение. Энергоресурсы и атомная энергетика

История развития цивилизации демонстрирует постоянно нарастающую потребность в энергообеспечении всех сфер производства.

Естественным стремлением человечества было решать проблему энергетики за счёт возобновляемых (в разумные исторические сроки) ресурсов. Использование энергии солнца, ветра, морей и рек практически не сказывается на экологической обстановке на планете и не приводит к её глобальным изменениям. Однако уровень современных знаний и техники не даёт возможности полностью решить проблему энергообеспечения такими источниками сегодня, и вряд ли это будет реализовано в течение ближайших десятилетий.

Положение с невозобновляемыми энергоносителями – газом, нефтью, углем, ядерным топливом – далеко небезоблачно из-за их исчерпаемости, глобального отрицательного воздействия на экологию, техногенности. Несомненно, что в грядущем XXI веке будут задействованы все энергоносители, по крайней мере, до ввода в промышленную эксплуатацию термоядерных электростанций. Поэтому использование того или иного энергоносителя в том или ином регионе будет определяться экономической целесообразностью и качеством технических решений, определяющих и экономику, и экологию, и безопасность.

К **атомной энергетике** – особое отношение: как к самой молодой и перспективной, как к самой потенциально опасной и в то же время наносящей минимальный ущерб экологии при штатной работе. В уходящем XX веке человечество в полную силу ощутило и разрушительную и созидательную мощь ядерной энергетики. Труднейшим в её реализации было разделение изотопов урана – самый масштабный пример селекции веществ по изотопному составу.

Элементарные выкладки дают представление о грандиозности решённой проблемы.

Методы разделения изотопов характеризуются фундаментальными параметрами: **коэффициентом разделения**, **выходом продукта** и **разделительной способностью** элементарной ячейки (Рис. 1). В ячейку входит поток питания L [кг] с концентрацией целевого

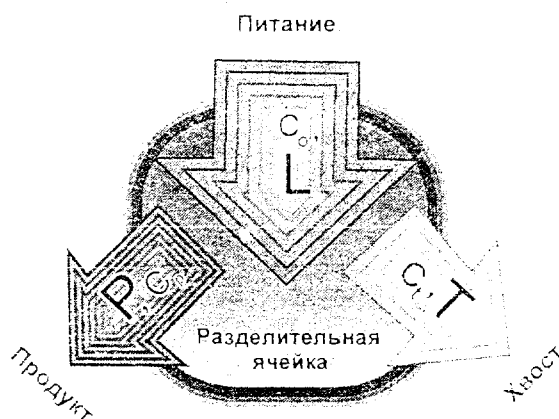


Рис. 1. Разделительная ячейка

изотопа c_o [%], и в результате процесса разделения из ячейки выходят поток обогащённого продукта P с концентрацией целевого изотопа c_p и поток обеднённых отвалных хвостов T с концентрацией целевого изотопа c_t .

- Коэффициент разделения при получении низкообогащённого урана для топлива АЭС можно определить как отношение концентраций целевого изотопа в продукте и хвосте: $\alpha = c_p/c_t$.
- Выражение для выхода продукта - P/L следует из уравнений балансов потоков и концентраций целевого изотопа:

$$Y = P/L = (c_o - c_t) / (c_p - c_t)$$
- Удельная разделительная способность ячейки определяется работой разделения, производимой над единицей массы обогащённого урана, и зависит от выхода и коэффициента разделения [1]:

$$\delta U(\alpha, Y) \cong 0.5 (1 - Y) (\alpha - 1)^2$$
- В свою очередь для получения единицы массы урана с обогащением $c_p = 3.2\%$ из природного $c_o = 0.71\%$, с концентрациями целевого изотопа в отвале $c_t = 0.2\%$ необходимо затратить [1]:

$$\delta U(c) = [\ln(c_o/c_t)] [c_p/c_t - 1] / [c_o/c_t - 1] - \ln(c_p/c_t) = 4,3 \text{ [ЕРР]}.$$

Реальные коэффициенты разделения газодиффузионных установок ~ 1.001 [2], центрифуг ~ 1.09 . Как следствие – тысячи ступеней разделения для газодиффузионного метода и десятки – для центрифуг. В итоге – десятки и сотни тысяч машин на разделительных предприятиях – уникальные по техническим решениям и по масштабности производства. Именно сейчас уместно напомнить, как и кем решалась эта задача.

Атомные электростанции производят в настоящее время приблизительно 18% электроэнергии в мире; этот показатель, по мнению многих экспертов, будет расти по мере экономического развития Азии и загрязнения окружающей среды продуктами сгорания органического топлива. В мире действуют ~ 440 реакторов, работающих на уране с обогащением $\sim 3 - 5\%$. Реакторы на быстрых нейтронах, работающие на природном уране, пока не применяются в промышленных масштабах, и, по оценкам, такое применение маловероятно в ближайшие десятилетия.

Таблица 1. Предприятия по обогащению урана

Страна	Принадлежность	Дислокация	Производительность [1000 кг ЕРР/год]
Газовая диффузия (ГД)			
China	CNNC	Lanzhou	900
France	EURODIF	Tricastin	10,800
United States	U.S. Enrichment Corp.	Paducah, Kentucky	11,300
		Portsmouth, Ohio	7,400
Всего (ГД)			30,400
Газовые центрифуги (ГЦ)			
China	CNNC	Hanzhong	500
Germany	Urenco	Gronau	1,100
Japan	JNC	Ningyo Toge	200
	Japan Nuclear Fuels, Ltd.	Rokkashomura	1,050
Netherlands	Urenco	Almelo	1,500
Pakistan	Pakistan Atomic Energy Commission (PAEC)	Kahuta	5
Russia	Minatom	Novouralsk (Ekaterinburg)	7,000
		Tomsk-7	4,000
		Krasnoyarsk-45	3,000
		Angarsk	1,000
United Kingdom	Urenco	Capenhurst	1,300
Всего (ГЦ)			20,655
Всего (ГД + ГЦ)			51,055

Данные на 30 марта 2000 г. www.antenna.nl/wise/uranium/efac.html

Для непрерывной работы типичного промышленного реактора (~1000 МВт) необходимы услуги по обогащению ~ 120 тыс. кг ЕРР в год. Международный рынок обогащения урана оценивается в 3.5 - 4 млрд. долларов ежегодно, что соответствует оплате услуг приблизительно в 33 млн. кг ЕРР/год. В связи с этим, совершенствование технологии во всех звеньях технологической цепочки в ядерной энергетике является актуальным.

В Таблице 1 представлены производители обогащённого урана и производственные мощности предприятий.

Производительность газодиффузионных предприятий более 30 млн кг ЕРР в год: на долю USEC (США) приходится около 19 млн кг ЕРР в год, на EURODIF – около 11 млн. кг ЕРР в год; частично метод используется в Китае и применялся ранее в СССР. Газодиффузионные заводы, используемые USEC, построены почти 50 лет назад, и эксперты полагают, что переход на новую технологию будет осуществлён в последующие 7-10 лет.

Максимальная производительность центрифужных предприятий у Минатома России – 15 млн. кг ЕРР в год; у URENCO (Германия, Нидерланды, Великобритания) – 3.9 млн. кг ЕРР в год и у JNFL (Япония) чуть более 1 млн. кг ЕРР в год

Суммарная производительность предприятий по обогащению урана (~ 50 млн. кг ЕРР/год) почти в полтора раза превышает нынешнюю мировую потребность в услугах по обогащению. Таким образом, пока нет необходимости в наращивании производственных мощностей, но остаётся потребность в совершенствовании методов обогащения, направленных на энерго - и ресурсосбережение и на сохранении конкурентоспособности на рынке услуг.

II. История развития и состояние производств по изотопному разделению урана

2.1. Россия

Основным толчком к развитию атомной энергетики в России явилось создание атомного оружия в США. Однако исследования по разделению изотопов урана велись в России ещё до Второй мировой войны [3,4].

В апреле 1940 г. Комиссия АН СССР по изотопам, руководимая академиком В.И.Вернадским, провела Всесоюзную конференцию по электролизному получению тяжелой воды и по разделению изотопов урана масс-спектроскопическим методом из паров металла и методом термодиффузии UF_6 .

- В 1943 г. сразу после организации Лаборатории № 2 (РНЦ «Курчатовский институт») были начаты работы по разделению изотопов урана в газовой фазе.
- В 1944 г. в Лаборатории электрических явлений в Уральском филиале АН СССР, руководимой И.К.Кикоиным, приступили к разработке методов разделения изотопов урана.
- В 1944 г. в Государственном союзном НИИ-42 Наркомхимпрома в лаборатории Б.В.Алексеева были получены первые 10 г UF_6 .
- В 1945 г конкретизированы направления работ и определены руководители:
 - газодиффузионный метод – И.К.Кикоин;
 - электромагнитный метод – Л.А.Арцимович;
 - термодиффузионный метод – А.П. Александров и И.К.Кикоин.

К работе были привлечены немецкие ученые:

М.Арденне - руководитель Института А (г. Сухуми); институт занимался разработками:

- электромагнитного метода разделения изотопов урана (М.Арденне),
- методов изготовления диффузионных перегородок (П. Тиссен);
- молекулярных методов разделения изотопов урана (М. Штеенбек).

Г. Герц - лауреат Нобелевской премии, руководитель Института Г (г. Сухуми);

задачи института:

- разделение изотопов методом диффузии в потоке инертного газа (Г.Герц);
- создание теории устойчивости диффузионного каскада (Г.Барвих);
- разработка масс-спектрометра для определения изотопного состава урана (В.Шютце);
- разработка диффузионных перегородок фильтров (Р. Райхман);

- 1 декабря 1945 г. принято Постановление Совнаркома СССР о сооружении первого в стране диффузионного завода. Научным руководителем завода назначен И.К.Кикоин.
- 21 августа 1946 г. – впервые осуществлено разделение изотопов урана на ионах его фтористого соединения электромагнитным методом под руководством Л.А. Арцимовича и Д.В. Ефремова.

- В 1949-1950 гг. была создана крупная установка СУ-20 в Свердловске-45 для электромагнитного разделения изотопов урана.
- В 1951 г. – начало серийного выпуска обогащённого до 90% урана на газодиффузионном заводе.
- В 1952 г. – вышло Постановление Правительства о Разработке отечественной конструкции промышленной центрифуги.
- В 1960-1964 гг. – строительство и сдача в эксплуатацию в Свердловске-44 первого в мире промышленного предприятия, оснащенного газовыми центрифугами. Первые центрифужные опытные заводы за рубежом появились лишь 10 лет спустя.
- 1966-1972 гг – оснащение всех разделительных предприятий СССР газоцентрифужной технологией.
- В 1992 г. прекращена эксплуатация газодиффузионных производств.

На внешнем рынке услуг по обогащению урана СССР был представлен В/О «Техснабэкспорт» с начала 70-х годов; первый контракт был заключен в 1971 г., поставки начались в 1973 г. В середине 70-х годов «Техснабэкспорт» заключил более десяти долгосрочных контрактов с покупателями почти всех западно-европейских стран, несмотря на то, что в то время рынок контролировался Министерством энергетики США. Многие из этих контрактов были заключены до 2000 года, некоторые – до 2010 г. Несколько контрактов были заключены с США [5].

В настоящее время проблем с ядерным топливом в России нет и в ближайшем будущем не предвидится [5,6]. Это даёт возможность разрабатывать новые технологии обогащения без излишней спешки и избегать дорогостоящих ошибок в определении оптимальной технологии, тщательно изучая физико-химические процессы, отработывая элементную базу для получения надёжных данных о перспективности метода и по стоимости единицы работы разделения, и по уровню инвестиций в строительство промышленного предприятия, и по глубине извлечения целевого изотопа.

2.2. США

В Соединенных Штатах 109 ядерными реакторами АЭС вырабатывается около 22% общего производства электроэнергии в стране. До 1974 г. Министерство энергетики США (DOE) было практически **монопольным поставщиком обогащенного урана** на мировом рынке, располагая самыми крупными в мире мощностями по производству обогащенного урана (газодиффузионные заводы в Ок-Ридже, Портсмуте, Падьюка общей производительностью 27.3 млн. кг ЕРР/год). Несмотря на то, что эти мощности в значительной степени перекрывали не только внутренние потребности США, но и потребности внешнего рынка, DOE было поставлено перед необходимостью перехода на новую технологию [5-10]. Действительно, к 1985 г. **доля США** в производстве обогащённого урана составила всего **47 %**. Стоимость топлива, производимого компаниями URENCO (ФРГ, Англия, Нидерланды) и EURODIF (Франция, Италия, Бельгия, Испания, Иран) оказалась ниже, чем у DOE. И внутри страны энергетическая ситуация складывалась таким образом, что производство ядерного топлива могло стать нерентабельным [11]. Расчеты, сделанные в начале 70-х годов, показали, что если прирост цен на электроэнергию (~15% в год) и темп инфляции будут сохраняться, то к началу 90-х годов обогащение урана газодиффузионным способом (при котором до 90% затрат приходится на электроэнергию) станет нерентабельным. Решением назревающей проблемы могла явиться новая технология разделения изотопов, с существенно меньшими энергозатратами, причем, ее внедрение должно быть завершено в 90-х годах.

В то время этим требованиям отвечали только газовые центрифуги. Затраты на обогащение урана для ядерного топлива могли быть снижены вдвое, причем на электроэнергию более, чем в 20 раз, хотя капитальные затраты даже могли превысить соответствующие цифры для газодиффузионных предприятий и составили бы около 5 млрд. долларов на каждое предприятие производительностью 10^7 кг ЕРР в год.

С 1970 по 1978 гг. были созданы и испытаны опытные центрифуги AGC SET III и разработаны усовершенствованные модели AGC SET IV - VI. производительностью 200 - 600 кг ЕРР/год, и в 1978 году начато строительство комбината в Портсмуте общей стоимостью 5 млрд. долларов на 25 тыс. центрифуг общей производительностью 12 млн. кг ЕРР/год.

Решение, продиктованное жестким прогнозом, было настолько дорогостоящим, что Министерство энергетики США сочло целесообразным продолжить поиски альтернативных вариантов. Во-первых, **попытка запустить первую очередь газоцентрифужного завода** в Портсмуте оказалась **неудачной**, и его **строительство**, на которое было затрачено 2.6 млрд. долларов, **прекращено**; 1100 изготовленных центрифуг демонтированы; заказы на остальные

24 тыс. центрифуг аннулированы, финансирование Министерством энергетики США исследовательских работ по центрифугам прекращено, во – вторых, к началу 80-х годов рост стоимости электроэнергии замедлился и к концу 1984 г. прекратился вовсе, и, в-третьих, в Ливерморе (LLNL) на лабораторных установках по лазерному разделению изотопов в атомном паре было получено к этому времени около пяти килограммов обогащенного урана при приемлемой стоимости [12]. В связи с этим высвободившиеся средства DOE, а позднее USEC направляют на реализацию программы по лазерной технологии обогащения топлива AVLIS [14-19], которая, в свою очередь, **была закрыта в 1999**, так как, по мнению экспертов USEC, уровень риска превышает ожидаемый экономический эффект. Компания приступила к расторжению контрактов с подрядчиками, сокращению технического персонала и плановому постепенному свертыванию работ по AVLIS в LLNL. USEC также приостанавливает строительную программу, касающуюся AVLIS [20].

К концу 80-х годов был **остановлен газодиффузионный завод в Ок-Ридже**, а в **июне 2001 года USEC начнет остановку работ на газодиффузионном заводе в Портсмуте**, штат Огайо.

С 1996 года USEC финансирует разработку лазерно-молекулярной технологии SILEX (*Separation of Isotopes by Laser Excitation*), о физических принципах которой пока ничего не известно. USEC принадлежит исключительное право на использование SILEX технологии для обогащения урана; USEC в ноябре 1996 года выплатила 7.5 миллиона долларов Silex за соответствующую лицензию. Silex Systems Ltd (Silex) и USEC (NYSE:USU) совместно разрабатывают технологию SILEX для потенциального развертывания в США, как ключевую технологию в мировом производстве обогащенного урана. Конечной целью (при условии успешного завершения Опытно-Конструкторской Программы SILEX) является экспорт технологии в Соединенные Штаты для промышленной эксплуатации, от которой Silex получит определенный процент.

2.3. Германия

В Германии разработки по созданию газовых центрифуг проводились перед Второй Мировой Войной, профессорами Мартином (Martin), Куном (Kuhn), Хартеком (Harteck), Гротом (Groth) и инженером Бейерлом (Beyerle).

По окончании войны некоторые специалисты и часть оборудования были вывезены на Запад и Восток. В частности, лаборатория Манфреда фон Арденне (Manfred von Ardenne) была переброшена из Западного Берлина в Сухуми. По свидетельству Г.Циппе (G. Zippe [21]), после бомбардировки Хиросимы и Нагасаки в Японии Арденне был вызван к Л.П.Берия, где ему было заявлено: «Такую бомбу Вы должны сделать теперь для нас!». Арденне заметил, что основная трудность – это обогащение природного урана изотопом ^{235}U . «Я предлагаю сделать для Вас эту часть. Эта работа будет весьма трудной». После получаса закрытого совещания Арденне сообщили: «Мы соглашаемся на ваше предложение. Мы даем Вам список людей, уже имеющих в нашем распоряжении. Выбирайте, кого Вы можете использовать для проекта и начинайте работать немедленно».

В Сухуми, в бывшем санатории около Агудзер, куда был направлен Арденне вместе с Г.Циппе, были уже собраны несколько известных ученых: Нобелевский лауреат Густав Герц (Gustav Hertz) - специалист по диффузному разделению изотопов, профессор Питер Тиссен (Peter Thiessen) - бывший директор знаменитого Исследовательского института Кайзера Вильгельма (Kaiser Wilhelm) в Берлине и доктор Макс Штеенбек (Max Steenbeck) - бывший директор завода «Сименс». По мнению учёных, единственный способ избежать в будущем использования ядерного оружия - это создание «ядерного баланса». Если обе стороны – и Запад, и Восток - будут иметь необходимый арсенал ядерного оружия, фактическое использование было бы бесполезно, потому что нет никакого смысла управлять полностью разрушенным миром.

В 1946 году Штеенбек и Циппе, а ещё ранее доктор Штойдель (Steudel) приступили к исследованиям возможности применения газовых центрифуг для разделения изотопов урана, поэтому в какой то мере основа технологии обогащения урана в Германии закладывалась в России.

21 марта 1948 г. одновременно на обеих установках Штеенбеком с Циппе и Штойделем было осуществлено успешное разделение урана.

К 1952 г. стадия экспериментальных исследований была завершена, и началась отработка технологии промышленного производства обогащённого урана.

В 1956 г. Штейнбек, Шеффель (Scheffel) и Циппе уехали из Советского Союза и заключили контракт, распределяющий их права на общую разработку газовой центрифуги, над которой они работали вместе с советскими учёными и инженерами. Согласно контракту, все патенты и другие права эксплуатации «центрифуги Циппе» в западном мире передаются

Циппе и Шеффелю, в то время как Штеенбек получил те же самые права во всех странах восточного блока.

В 1958 г. Циппе и Шеффель начали работать в лаборатории DEGUSSA во Франкфурте. Все патенты (зарегистрированные в Австрии) были переданы в DEGUSSA. DEGUSSA подтвердила в контракте, что создаваемые центрифуги будут использованы только в мирных целях.

В июле 1958 г. было заключено соглашение о сотрудничестве с полным обменом информацией по разработке центрифуг между фирмой DEGUSSA и Вирджинским Университетом (Charlottesville, США) в рамках общего соглашения о сотрудничестве в этой области между Комиссией по атомной энергии США и немецким Министерством по атомной энергии.

В 1960 году после двухлетней совместной работы в США по ресурсным испытаниям и выяснению разделительной способности короткой газовой центрифуги, а также работ по воссозданию последней советской модели центрифуги SS2-100 в Германии Комиссия по атомной энергии США решила не продолжать дальнейшее сотрудничество.

По требованию американцев вся программа работ по газовым центрифугам в Германии была пересмотрена, и в **1964 году** целая лаборатория и часть штата были перемещены из Франкфурта в Центр Ядерных Исследований в окрестностях Юлиха (Juelich). Была основана новая правительственная компания, цель которой состояла в том, чтобы за 5 лет выяснить, будет ли центрифужный метод способным конкурировать с другими процессами обогащения. На этом этапе к проекту подключились промышленные фирмы ERNO, DORNIER и INTERATOM.

В 1967 г. были введены в эксплуатацию большие каскады из подкритических центрифуг. В это же время интенсифицировались разработки надкритических центрифуг. Фирма M.A.N (Maschinenfabrik Augsburg Nuernberg) организовала массовое производство таких центрифуг для первых промышленных каскадов.

В 1969 г. Нидерланды и Великобритания приняли решение объединить усилия с Германией в работе над использованием газовых центрифуг для производства низкообогащенного урана для ТВЭЛов атомных электростанций. Переговоры этих стран и обмен информацией относительно состояния технологии закончились известным Альмелским договором («**Almelo Treaty**»), который был ратифицирован этими странами в **1970 году**. Была основана совместная корпорация URENCO, и в Альмело (Almelo – Нидерланды), Капенхурсте (Capenhurst – Англия) и Гронау (Gronau – Германия) созданы промышленные предприятия по производству низкообогащенного урана для обслуживания атомных электростанций. В первых промышленных каскадах были установлены подкритические машины. Но позже фирма M.A.N. снабдила все три предприятия надкритическими центрифугами.

Общая производительность заводов URENCO - приблизительно 4000 тонн ЕРР/год, и планируется их дальнейшее расширение.

2.4. Япония

В Японии разработка технологии обогащения урана методом центрифугирования была начата в **1959 г.** в Институте Физических и Химических Исследований в г. Вако (Institute of Physical and Chemical Research) по результатам фундаментальных исследований в этой области [22]. По решению правительства Японии, начиная с **1961 года**, работы по созданию промышленной технологии обогащения урана на базе газовых центрифуг ведутся под патронажем корпорации **Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. (PNC)**.

Параллельно в Институте физических и химических исследований осваивалась американская и разрабатывалась собственная газодиффузионная технология обогащения урана в сотрудничестве с Исследовательским институтом атомной энергии Японии (Japan Atomic Energy Research Institute).

В 1969 году впервые в Японии был получен **обогащенный уран**.

Почти в то же время PNC, в ответ на создание Европейской корпорации URENCO, объединившей усилия Великобритании, Западной Германии и Нидерландов по разработке промышленной центрифужной технологии обогащения урана, успешно осуществила обогащение урана на малой центрифуге.

Основываясь на этом результате, Комиссия по атомной энергии Японии (АЕС) приняла в **1969 г. основную программу по обогащению урана**, и государственное финансирование увеличивалось из года в год от нескольких десятков миллионов иен до масштаба одного миллиарда иен ежегодно и в результате были проведены полномасштабные испытания по обогащению урана. Ещё одним серьёзным достижением была разработка и создание надкритической центрифуги.

В 1972 г. правительство Японии, рассмотрев результаты исследований по разработке технологии центробежного метода разделения изотопов урана, приняло решение считать разработку промышленной технологии **обогащения урана газовыми центрифугами национальной программой** с бюджетом ~ 10 миллиардов иен в год. При создании пилотного завода PNC выполняла необходимые теоретические и экспериментальные исследования, разрабатывала концептуальный проект, планировала и контролировала ход всех работ; корпорация Toshiba, Hitachi, Ltd. и Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. осуществляли техническое проектирование, изготовление и стендовые испытания оборудования.

В 1982 году по результатам эксплуатации пилотного завода АЕС Японии приняла решение о строительстве демонстрационного **завода** производительностью **200 т ЕРР/год**, вчетверо превосходящей производительность пилотного завода. Демонстрационный завод должен был стать переходным этапом к созданию промышленного предприятия.

В 1985 г. была образована Japan Nuclear Fuel Industries Co, Inc. (JNFI), которая позднее стала именоваться Japan Nuclear Fuel Limited (JNFL). Эта компания в 1988 г. получила лицензию на право оказания услуг по обогащению урана производительностью **600 т ЕРР/год** и построила промышленное предприятие в Rokkasho Village, Aomori Prefecture.

В марте 1992 г. предприятие было запущено. Таким образом, центрифужный разделительный метод, который PNC разрабатывала в течение 23 лет, был успешно внедрен в промышленное производство.

Наряду с этим некоторые электроэнергетические компании, PNC и JNFI ещё в 1986 году заключили соглашение о сотрудничестве в исследованиях по разработке промышленной центрифуги с ротором из композита. Их усилия увенчались строительством пилотного завода с использованием таких центрифуг.

Однако эти исследования не были последними. JNFL и электроэнергетические компании в 1993 году предложили новое совместное исследование опытной центрифуги с упрощенной структурой ротора, сравнительно малым отношением длины к диаметру, но с более высокой периферийной скоростью. В результате была создана центрифуга которую можно считать вполне конкурентоспособной по стоимости услуг по обогащению на мировом рынке.

Тем не менее, после реорганизации PNC в Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC) японское правительство приняло решение **прекратить финансирование разработки технологии обогащения урана центрифугами**. Tokai Works намерено передать свои разработки высокоэффективной лидирующей центрифуги компании JNFL, которая, как предполагается, будет преемником развития центрифуг в Японии.

2.5. Франция (EURODIF)

Франция является основоположником компании **EURODIF**, созданной в **ноябре 1973 г.** совместно с **Бельгией, Испанией и Италией** для строительства и эксплуатации предприятий по **обогащению урана [23-26]**. Долевое участие стран и компаний, входящих в EURODIF представлено в Таблице 2.

Таблица 2

Страна	Фирма, организация	Долевое участие
Франция	COGEMA – Compagnie Generale des Matieres Nucleaires	36,528
Франция - Иран	SOFIDIF – Societe franco-iranienne pour l'enrichissement de l'uranium	25,00
Италия	ENEA – Energia Nucleare e della Energia Alternative	8,125
Италия	Agipe Nucleare	8,125
Испания	ENUSA – Empresa Nacional del Uranio, SA	11,11
Бельгия	SOBEN – Societe belge pour l'enrichissement de l'uraniume	11,11

На основе усовершенствованной газодиффузионной технологии, разработанной под эгидой Комиссариата по атомной энергии Франции (КАЭ) в 1979 г. в **Трикастене (Франция)** был построен первый крупнейший в Западной Европе **завод** (рис.2, 3) производительностью **10,8 млн. кг ЕРР/год**.

На конец 1980 г. мощность завода в Трикастене составляла 6,5 млн. кг ЕРР/год, а в 1982 г. завод достиг полной проектной мощности 10,8 млн. кг ЕРР.

В 1985-1986 гг. завод работал на 80% номинальной мощности. В 1987 г. загрузка завода в Трикастене увеличилась до 85%, производство составило свыше 8,6 млн. кг ЕРР.

Газодиффузионный завод в Трикастене является основным поставщиком обогащенного урана для французской ядерной энергетики и для ядерной энергетики стран, входящих в EURODIF, и его производительность составляет ~ 25 % мирового рынка услуг по обогащению.

Несмотря на то, что технология, разработанная EURODIF, самая совершенная газодиффузионная технология, ей присущи проблемы, свойственные данной технологии: велика доля вклада электроэнергии в стоимость работы разделения, небольшая глубина извлечения целевого изотопа (его концентрация в отвале 0,3-0,5%), практическое исчерпание резервов качественного совершенствования метода.



Рис. 2. Обоганительный завод Georges-Besse в Трикастене (Франция).

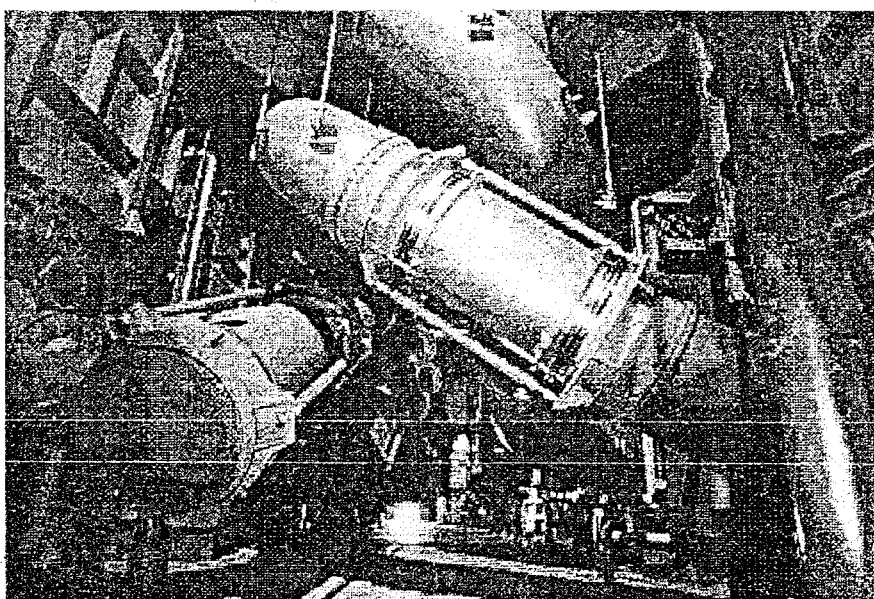


Рис.3. Диффузионные установки EURODIF в Трикастене, Франция.

III. Перспективы совершенствования технологии обогащения урана.

Наиболее реальным представляется сейчас **совершенствование центрифуг**, хотя их качественное совершенствование, по мнению многих специалистов, весьма ограничено. Менее реальными выглядят сегодня различные лазерные методы, хотя и обладают несомненными потенциальными преимуществами, для реализации которых могут потребоваться серьёзные усилия учёных, и инженеров, и воля правительств. К сожалению, сегодня нет достаточно обоснованного ответа, стоит ли игра свеч. И в то же время лишь незначительное число скептиков утверждает о нецелесообразности продолжения фундаментальных исследований в этом направлении.

Лазерные методы разделения изотопов основываются на различиях в спектрах поглощения атомов или молекул с различным изотопным составом. Поэтому, лазерное излучение определенных частот может селективно возбудить, а затем ионизовать или диссоциировать преимущественно атомы или молекулы, содержащие целевой изотоп (возможны также химические реакции селективно активированных молекул с реагентом). Методы лазерного разделения изотопов подразделяются на атомарный - **AVLIS** (*Atomic Vapor Laser Isotope Separation*) и молекулярные - **MLIS** (*Molecular Laser Isotope Separation*) - **CRISLA** (*Chemical Reaction Isotope Separation by Laser Activation*) и **SILEX** (*Separation of Isotopes by Laser Excitation*) - в зависимости от объекта воздействия – атомный пар или молекулы.

Первой главной особенностью лазерных методов в сравнении с кинетическими является гораздо более высокие удельные разделительные способности единичной ячейки разделения из-за высоких коэффициентов разделения (несколько единиц), которые, в свою очередь, определяются высокой селективностью процессов разделения.

Второй не менее важной особенностью является высокая производительность ячейки.

Совокупность этих двух особенностей приводит к ряду потенциальных преимуществ лазерных методов по сравнению с традиционными кинетическими:

- возможность уменьшения числа ступеней разделения практически до единицы;
- уменьшение в тысячи и десятки тысяч раз общего числа разделительных ячеек на предприятии по обогащению урана;
- уменьшение в сотни раз количества гексафторида урана, одновременно находящегося на предприятии в процессе обогащения (hold-up), и снижение времени выхода на стационарный режим (start-up) от недель и месяцев до часов.
- В конечном счёте, применение лазерных методов может заметно снизить себестоимость услуг по обогащению урана.

Вопрос о том, насколько полно могут быть реализованы указанные потенциальные возможности лазерных методов обогащения урана, может быть решен лишь в условиях, моделирующих промышленное производство.

Для оценки требований, которые следовало бы предъявить к перспективным технологиям целесообразно проанализировать структуру цены ядерного топлива.

Ядерный топливный цикл складывается из разработки месторождений полезных ископаемых, измельчения и обработки урановой руды для производства порошка оксида урана, обслуживания отвалов переработки руды, конверсии оксида в газообразный UF_6 , изотопного обогащения урана (UF_6), обслуживания отвальных хвостов разделительных заводов, приготовления топлива - конверсии UF_6 в оксид, изготовления топливных таблеток, начинки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), загрузки тепловыделяющих элементов в реактор атомной электростанции, где они остаются до выгорания топлива, последующего временного хранения отработанного топлива на месте, размещения на долгосрочное хранение.

По оценкам экспертов **изотопное обогащение урана** составляет основную часть затрат при производстве ядерного топлива - приблизительно 30%.

В таблице 3 представлена структура затрат на производство 1000 тонн урана, обогащённого до $c_p = 3.2\%$. [www.antenna.nl/wise]

В первом столбце приведены данные для обогащения природного урана - $c_o = 0.71\%$ и концентрации целевого изотопа в отвале - $c_t = 0.2\%$. Для этого необходимо получить $L_o = 5941$ т урана стоимостью $\$L_o = \301 млн. Конверсия 5941 т урана в гексафторид урана даёт ~8744 т UF_6 и стоит - $\$Conv. \sim \15 млн. Обогащение требует разделительной работы - $SWU \sim 4777$ т ЕРР стоимостью - $\$SWU \sim \382 млн. В этом случае **1000т обогащённого урана стоит \$698 млн.** В отвал при этом попадает - $T(UF_6) \sim 7257$ т обеднённого UF_6 , обслуживание которого стоит $\$T(UF_6) \sim \798 млн. Следует обратить внимание, что стоимость обслуживания отвальных хвостов разделительного процесса более чем вдвое превышает стоимость работы

разделения, так как в нее входит стоимость переработки и захоронения конечных отходов, рассматриваемых как радиоактивные.

Таблица 3. Структура затрат на производство 1000 тонн обогащённого урана

C_o (%)	0,71	0,71	0,3	0,2
C_t (%)	0,2	0,07	0,07	0,07
Lo (t)	5942	4940	13610	24077
\$ Lo (mln)	301	251	0	0
\$Conv.(mln)	15	13	0	0
SWU (t SWU)	4777	7631	16110	21600
\$ SWU (mln)	382	611	1289	1728
\$S (mln)	698	875	1289	1728
$T(UF_6)$ (t)	7257	5783	18650	34131
\$ $T(UF_6)$ (mln)	798	636	2051	3754

Во втором столбце приведены аналогичные данные, но для более глубокого извлечения целевого изотопа ($c_t = 0.07\%$), в третьем и четвёртом - для обогащения отвалного обеднённого гексафторида урана (ОГФУ) с исходным содержанием целевого изотопа c_o , соответственно 0.3% и 0.2%.

Увеличение глубины извлечения целевого изотопа от 0.2% до 0.07% приводит к увеличению стоимости топлива на 25%.

Совсем иная ситуация складывается при оценке возможностей дообогащения отвалных хвостов. Стоимость топлива возрастает на 85% при $c_o = 0.3\%$, и почти в 2.5 раза при $c_o = 0.2\%$, и разделительных мощностей даже крупного завода практически не хватит для ежегодного производства такого количества обогащённого урана.

Таким образом, для эффективного и экономически выгодного извлечения целевого изотопа из отвалных хвостов необходимо создание не только новой технологии разделения изотопов урана, но и новой технологии обслуживания практически полностью обеднённых отвалов.

Основным ориентировочным критерием при разработке перспективных технологий должно быть непревышение затрат на производство обогащённого урана из отвалных хвостов в сравнении с обогащением природного урана (с учётом инвестиций в разработку и создание новой технологии) при производстве топлива в одинаковом количестве и с одинаковым качеством.

Создание такой технологии даст возможность производить из накопленных за несколько десятилетий в мире отвалов (~ 1,2 млн. тонн) по ~ **5 тыс. тонн** обогащённого урана ежегодно в течение ~ 20 лет.

Литература

1. *Advances in Nuclear Science and Technology*, 6, 105 (1972)
2. Научно-экспериментальная база атомной промышленности зарубежных стран. Справочник. Под ред. Круглова А.К., Смирнова Ю.В., Москва, Энергоиздат (1987)
3. Атомный проект СССР. Под редакцией Л.Д.Рябева, Москва, НАУКА-ФИЗМАТЛИТ. (1998)
4. Круглов А.К. *Как создавалась атомная промышленность в СССР*. Москва, ЦНИИАТОМИНФОРМ (1995)
5. Chernov A.G., Nikipelov B.V. *Nuclear Europe Worldscan*, No 3-4, 9 (1990)
6. Nikipelov B.V., Vlasov A.A. *Nuaxko* (1991)

7. *Nuclear Fuel*, **15**, No 2, Jan. 22, 11 (1990)
8. *Nuclear Fuel*, **14**, No 24, Nov. 27, 3 (1989)
9. *Nuclear Fuel*, **15**, No 3, Feb. 5, 3 (1990)
10. *Nuclear Fuel*, **14**, No 26, Dec. 25, 12 (1989)
11. *Inside Energy*, Jan. 22, 3 (1990)
12. *Energy Daily*, **18**, No 20, Jan. 30, 1 (1990)
13. *Science*, **223**, No 4640, March 9, 1041 (1984)
14. *Nuclear Fuel*, **10**, No 15, July 29, 3 (1985)
15. *Nuclear News*, **28**, No 9, July, 36 (1985)
16. *New Scientist*, June 13 (1985)
17. *Nuclear News*, **28**, No 9, July, 36 (1985)
18. *Nuclear Engineering International*, **30**, No 371, July, 2 (1985)
19. *Nuclear Engineering International*, **30**, No 373, August, 13 (1985)
20. www.usec.com/Structure/Navigation/ThirdTier/newsreleases/06-09-99b.html
21. Zippe Gernot. "Historical review on the development of gas centrifuges for uranium enrichment". In "Sixth workshop proceedings" of Conf. "Separation Phenomena in Liquids and Gases". Nagoya University, Japan (1998)
22. Takahashi Tsukasa, Kai Tsunetoshi, Yamamoto Fumio, Shibata Tomofumi, Yato Yumio. "History and Current Status of Development of Gas Centrifuge Uranium Enrichment Technology at Tokai Works, PNC" In "Sixth workshop proceedings" of Conf. "Separation Phenomena in Liquids and Gases". Nagoya University, Japan (1998)
23. *Jahrbuch der Atomwirtschaft*, A-50 (1987)
24. *Nucl. Engineer.*, **28**, 170 (1988)
25. *Guide International de l'Energie Nucleaire*, 174 (1986)
26. *Revue Generale Nucleaire*, Supplement speciale (1986)