



1. Введение

На заре развития атомной энергетики для массового производства обогащённого урана рассматривались, по крайней мере, три возможных метода: **газодиффузионный, электромагнитный и центрифужный.**

Газодиффузионный метод основан на разной проницаемости пористых структур для частиц с разными массами. Так как скорости диффузии обратно пропорциональны квадратным корням из молекулярных весов, максимальный коэффициент разделения единичного модуля определяется выражением:

$$\alpha_{\max} \sim (M_2/M_1)^{1/2},$$

где M_1 - молекулярный вес более легкого газа, M_2 - более тяжелого.

Применительно к разделению изотопов урана эта формула демонстрирует величину проблем. Самым удобным для разделения изотопов летучим соединением урана является UF_6 . Это соединение достаточно устойчиво, давление насыщенного пара - одна атмосфера при температуре $56^\circ C$, и чрезвычайно важно, что фтор имеет только один изотоп. Поэтому разделяются только две молекулы - $^{235}UF_6$ и $^{238}UF_6$ с молекулярными весами - 349 и 352. Таким образом, максимальный теоретический коэффициент разделения $\alpha_{\max} \sim 1.0043$. Реальный коэффициент разделения существенно меньше: ~ 1.001 [1]. Платой за столь низкий коэффициент разделения является гигантское количество ступеней разделения: например, для получения урана с концентрацией целевого изотопа $c_p = 3.2\%$ при обогащении природной смеси молекул ($c_o = 0.71\%$) и содержанием в отвальном хвосте $c_t = 0.2\%$, ~ 1000 ступеней разделения.

Тем не менее этот метод отличается простотой и надежностью, но требует исключительно больших затрат электроэнергии (до 80% от общей стоимости продукта) и значительных капитальных вложений.

Hold-up - общее количество материала, задействованного одновременно в процессе обогащения на предприятии с газодиффузионной технологией, достигает десятков тысяч тонн.

Start-up - время выхода разделительного комплекса на стационарный режим - недели - месяцы.

Газодиффузионный метод применяется на всех предприятиях США, корпорации EURODIF, частично 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.

Электромагнитный (масс-спектрографический) метод основан на различии траекторий движения частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях с одинаковым зарядом, но разными массами.

Основными достоинствами метода являются:

- высокий коэффициент разделения в основном цикле;
- возможность одновременного обогащения всех изотопов разделяемого элемента в одной разделительной установке;
- универсальность, позволяющая применять одну и ту же установку для разделения стабильных и радиоактивных изотопов самых различных элементов;
- автономность отдельных разделительных установок;
- возможность разделения очень малых количеств веществ (мг);
- минимальные значения hold-up и start-up.

Основные недостатки:

- малая производительность;
- малый коэффициент использования веществ в одном цикле разделения;
- наличие значительных безвозвратных потерь вещества;
- относительно большие энергетические и эксплуатационные затраты.

Непосредственно для разделения этот метод применяется в тех случаях, когда требуется небольшое количество (до 1 кг/год) изотопически чистых веществ. Тем не менее, электромагнитным методом в США впервые удалось получить значительные количества высокообогащённого оружейного урана еще в военное время. В Ок-Ридже был построен большой завод, состоящий из нескольких независимых установок для электромагнитного разделения урана. Несколько позднее в 1949-1950 гг и в СССР была создана крупная установка **СУ-20 в Свердловске-45** для электромагнитного разделения изотопов урана [2]. В дальнейшем эти установки использовались для разделения изотопов других элементов.

В газовых центрифугах, занимающих лидирующее положение в технологиях обогащения урана – реализуется метод, использующий псевдогравитационные силы большой величины. В центрифуге имеет место противоток - ниспадающий поток газа во внешней части вращающегося цилиндра и восходящий поток газа в центральной или осевой области. Сквозь промежуточный район идет постоянная диффузия обоих типов молекул из одного потока в другой, но радиальное силовое поле центрифуги сильнее действует на тяжелые молекулы, чем на легкие, поэтому концентрация тяжелых молекул растет в периферийной области и уменьшается в осевой и, наоборот, для легких молекул.

Большая привлекательность центрифуг в разделении тяжелых изотопов таких как изотопы урана – состоит в том, что, в отличие от газовой диффузии, коэффициент разделения зависит не от квадратного корня из отношения масс, а от разности масс двух изотопов. Выражение для коэффициента разделения оптимальной газовой центрифуги имеет вид [3]:

$$\alpha_{opt} = 1 + (\Delta M V_r^2 / 2RT) (Z/r_2) E^{1/2},$$

где ΔM – разность масс изотопов, V_r – окружная скорость центрифуги, Z/r_2 – отношение длины к внешнему радиусу центрифуги, E – некоторый коэффициент использования потока. В данном случае оптимальное значение коэффициента разделения - $\alpha_{opt} = 1.085$, что почти на порядок больше реального коэффициента разделения газодиффузионной ячейки. Как следствие – снижение ~ в 100 раз числа ступеней разделения. Однако производительность единичной оптимальной центрифуги столь мала, что для полномасштабного предприятия их требуется десятки и сотни тысяч.

Первое сообщение о центрифуге для разделения газов и изотопов было сделано в 1935 году профессором **Jesse W. Beams** в Вирджинском Университете в Charlottesville, США. Это был цилиндрический ротор центрифуги, вращающийся в вакуумном корпусе и управляемый воздушной турбиной [4]. А в 1937 году Ю.Б.Харитон изложил основы теории прямоточной бесциркуляционной центрифуги для разделения газовых смесей[5].

2. Разработка газовых центрифуг в России и Германии.

В январе 1943 года в Записке академика В.Г.Хлопина в Совнарком и АН СССР о плане работ по Атомному проекту первым пунктом предлагалась: «...1. Опытная проверка предложенного профессором Ланге метода центрифугирования для разделения изотопов урана в целях выяснения оптимальной конструкции и габаритов установки, а также снятия технологических показателей...». В том же месяце этот пункт был включен И.В.Курчатовым в План работы по Проекту [6].

Но как это иногда случается в истории, достоверные разведматериалы о научно-исследовательской работе в Англии по проблеме урана сыграли драматическую роль в выборе оптимальной на тот момент технологии обогащения урана у нас в стране. В марте 1943 года И.В.Курчатов в Записке Правительству с анализом этих материалов отмечает [6]: «Наиболее ценная часть материалов относится к задаче разделения изотопов.

1. Единственным рациональным путем ее решения принимается разделение изотопов при помощи диффузии через мембрану с мелкими отверстиями. Предпочтение метода диффузии методу центрифугирования для наших физиков и химиков явилось неожиданным. У нас была распространена точка зрения, согласно которой возможности метода центрифугирования стоят значительно выше возможностей метода диффузии, который считался практически не применимым для разделения изотопов тяжелых элементов. В соответствии с этой точкой зрения вначале, при постановке работ по проблеме урана, предусматривались исследования только с центрифугой... Получение материала заставило наряду с центрифугированием включить в план работ по проблеме и метод разделения диффузией».

В результате газовая диффузия на длительное время стала приоритетным направлением в технологии обогащения урана.

В 1944 г. в Лаборатории электрических явлений в Уральском филиале АН СССР, руководимой И.К.Кикоиным, приступили к разработке газокинетических методов разделения

изотопов урана, в которые, тем не менее, входили работы над созданием горизонтальной высокооборотной газовой центрифуги при участии Ф.Ф.Ланге [2].

В 1946 году к работе над центрифугами были привлечены немецкие ученые М. Штеенбек и Г.Циппе, направленные в Сухуми [2,4]. Они 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. Первые эксперименты проводились с толстостенным резиновым корпусом, установленным на оси электрического двигателя с переменной частотой вращения. Затем было высказано предложение о разработке 10-метровой тонкостенной газовой центрифуги с периферийной скоростью ~ 250 м/сек в качестве машины для обогащения урана в одну ступень от природной смеси изотопов до оружейного урана.

В Сухуми были доставлены три работы по газовым центрифугам: книга Смита (Smyth), касающаяся Манхэттэнского проекта, доклад профессора Бимса (Beams) относительно его первых трубчатых центрифуг для разделения изотопов, опубликованный в 1935 году и доклад профессора Хутерманса (Houtermans), прежнего коллеги Ардече. В докладе по Манхэттэнскому проекту отмечалось, что возможность использования газовых центрифуг для разделения изотопов урана обсуждалась, но предпочтение было отдано методу газовой диффузии. В докладе профессора Бимса сообщалось, что не было найдено ограничения на длину роторов центрифуги. Профессор Хоутерманс заключил, что метод, использующий газовые центрифуги для разделения изотопов урана будет наиболее экономичным и энергосберегающим, по сравнению со всеми другими известными методами.

Ученые и инженеры в Сухуми не верили в предложенные Штейнбеком «вращающиеся трубки», как они называли центрифуги, так как очевидно, что они должны были пройти много критических частот вращения, прежде чем достичь эксплуатационной скорости. Несмотря на то, что такая машина никогда и нигде в мире не была реализована, было принято решение опробовать этот тип газовой центрифуги.

Однако опыты с длинными трубками были неудачными. Сначала они изгибались как банан, затем разрушались в средней части по достижении первой критической скорости. Чем короче была трубка, тем выше была скорость, при которой трубка начинала изгибаться.

Тогда Штейнбек предложил тонкостенный ротор длиной 3 метра и диаметром 58 мм, состоящий из 10 отрезков жестких труб из алюминиевого сплава, соединенных 9 гибкими сильфонами. Гениальным изобретением Штейнбека была тонкая стальная игла, на которую опирался ротор, верхний конец удерживался с помощью постоянного магнита. Были проведены ресурсные испытания (более 1000 часов) группы из шести таких центрифуг. Скорость варьировалась в пределах 1200 - 1400 оборотов в секунду в зависимости от алюминиевого сплава трубки центрифуги. Соответственно, периферийная скорость изменялась в пределах 220 - 240 м/сек. В испытаниях по разделению изотопов урана с этими типами роторов были получены необходимые коэффициенты разделения. Материальные потери на одну ступень не превышали 0.15 % гексафторида. Разделительная способность составляла ~ 50% от теоретического максимума [4].

Однако каскадирование такой надкритической центрифуги в промышленном масштабе представляло практически неразрешимую проблему. Кроме того, такие центрифуги не могли работать длительное время с высокой надежностью. Выход из этого тупика был найден талантливым инженером Е.М.Каменевым и И.К.Кикоиным: Е.М.Каменев выдвинул идею центрифуги с коротким жестким тонкостенным ротором и нижней игольчатой опорой, что дало возможность заметно повысить скорость вращения ротора из алюминиевого сплава, а И.К.Кикоин предложил использовать неподвижные отборные трубки (Пито) для отбора газов и передачи его по каскадам центрифуг. На этих принципах была построена центрифуга доктора Штойделя (Steudel) с ротором длиной ~ 30 см и диаметром ~ 3 см на магнитной подвеске[5].

21 марта 1948 г. одновременно на обеих установках Штейнбеком с Циппе и Штойделем было осуществлено успешное разделение урана-235.

Эти первые центрифуги с короткими роторами из алюминиевого сплава уже тогда были оснащены специальными подшипниками на верхней и нижней опорах, чтобы справиться с прохождением критических частот в режиме ускорения и в рабочем режиме ротора!

К 1952 г. стадия экспериментальных исследований была завершена, вышло Постановление Правительства о Разработке отечественной конструкции промышленной центрифуги [2], и началась отработка технологии промышленного производства обогащенного урана.

В 1956 г. Штейнбек, Шеффель (Scheffel) и Циппе уехали из Советского Союза и заключили контракт, определяющий 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 1957 г. Г.Циппе патентует «**центрифугу Циппе**» (патент № 1071597), фактически разработанную специалистами ОКБ ЛКЗ. Из-за нежелания делать достоянием гласности, что в СССР разработан более эффективный по сравнению с газодиффузионным центрифужный метод получения обогащенного урана, патент Циппе не был опротестован, и мир оставался в неведении ещё более 30 лет.

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; разделительная мощность увеличилась в 2,4 раза, потребление электроэнергии сократилось в 8,2 раза.

Россия продолжает оставаться лидером в центробежной технологии обогащения урана [7,8]. За время функционирования технологии разработаны и внедрены в производство **5 поколений** газовых центрифуг. В последней модели удельное **потребление электроэнергии** на ЕРР в **25 раз меньше** по сравнению с газодиффузионными машинами. Основное оборудование центрифужной технологии работает **непрерывно и не требует** проведения **обслуживания и ремонтных работ** в течение всего установленного ресурсного срока работы машин ~ **15 лет** с вероятностью выхода из строя менее нескольких десятых процента в год. У газовых центрифуг небольшой расход гексафторида урана на каждую машину. Это обеспечивает большую степень производственной гибкости, заключающейся в возможности выбора каскада в зависимости от состава конечного продукта или отвала. Завод может сооружаться с оптимальным числом центрифуг в каскаде, что позволяет практически избежать потерь.

Машины такого типа успешно применяются для разделения стабильных изотопов: железа, вольфрама, ксенона, серы, молибдена и др. Они также были использованы для получения некоторых высокочистых радиоактивных изотопов, например, ^{85}Kr и ^{56}Fe . Имеется реальная возможность использования центробежной технологии для обогащения отработанного топлива [7].

События в Германии развивались следующим образом [4].

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.

Первая задача состояла в том, чтобы разработать и продемонстрировать каскады центрифуг, производящие низко обогащенный уран для ТВЭЛов. Такой каскад был создан из 21 машины типа SS2-100. Периферийная скорость роторов достигала 400 м/сек. Выход этого каскада был около 5 кг низко обогащенного урана в год. При таких скоростях начали проявляться проблемы с ротором: даже лучший алюминиевый сплав становился текучим. Решение этой проблемы было найдено в фирме, производящей в массовом масштабе тонкие трубки из мартенситной стали для малых ракет. Использование таких трубок дало возможность даже увеличить периферийную скорость вращения. Был найден оптимальный диапазон диаметров трубок ротора – между 100 и 200 миллиметрами. 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. Уже на первых испытаниях был получен выход, вдвое превышающий выход на подкритической машине. 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. Потребность в электроэнергии предприятия, оснащённого газовыми центрифугами (рис.1), составляет ~ 2% от потребности газодиффузионных заводов той же производительности. Интенсивность отказов механизмов меньше десятой доли процента ежегодно.

Заканчивая раздел, следует отметить, что сотрудничество русских и немецких учёных и инженеров пусть даже в необычных условиях способствовало успешному становлению центрифужной технологии обогащения урана и в России, и в Германии.

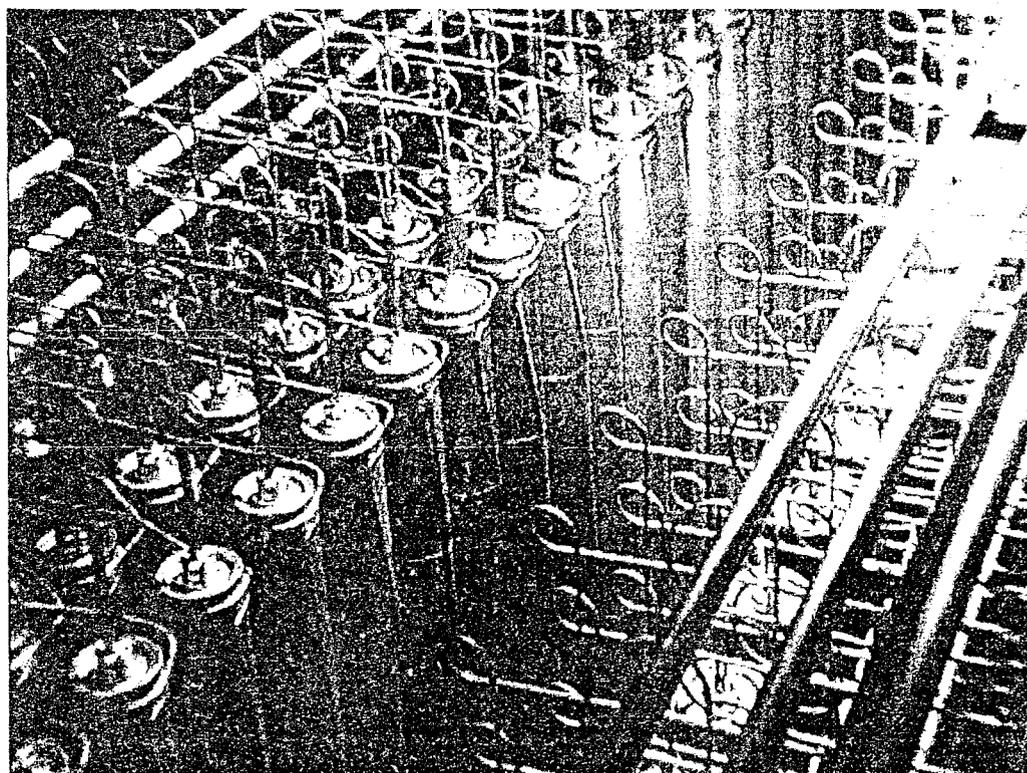


Рис.1. Центрифуги на заводе URENCO.

3. Разработка газовых центрифуг в Японии

В Японии разработка центрифуг была начата в 1959 г. [9]. Однако первые изготовленные и испытанные газовые центрифуги (машины № 1 и № 2) не были предназначены для разделения изотопов урана.

В 1964 г. машины № 1 и № 2 были переданы в Tokai Works, где продолжалась их отладка и испытания, а также были проведены успешные эксперименты по разделению изотопов аргона, ксенона и серы (SF_6). Опыт, приобретённый при разработке и эксплуатации машин № 1 и № 2, был использован при изготовлении машины № 3 для разделения изотопов урана.

С 1969 г. на базе машины №3 проводились полномасштабные испытания по обогащению урана. Эти испытания выявили основные технологические проблемы газовой центрифуги. В простейшей центрифуге практически единственным принципиальным параметром, влияющим на коэффициент разделения, является периферическая скорость вращения ротора. В противоточной центрифуге появляется возможность повысить коэффициент разделения, увеличивая отношение её высоты к радиусу. Увеличение периферической скорости вращения ротора до нескольких сотен метров в секунду потребовало разработки новых (композитных) материалов для ротора, а увеличение высоты центрифуги привело к необходимости создания специальных технологических устройств, демпфирующих колебания ротора при прохождении резонансных частот, которые могут быть причиной потери продольной устойчивости центрифуги. Первые центрифуги могли непрерывно работать только одну неделю из-за несовершенства элементной базы (уплотнения, подшипники и т.п.).

Ещё одним серьёзным достижением была разработка и создание надкритической центрифуги. Испытания проводились сразу на нескольких типах центрифуг. В результате трёхлетних испытаний была выбрана в качестве унифицированного промышленного модуля одна из машин, намного превосходящая по разделительной способности и ресурсу машину №3. **Ресурс современных центрифуг ~ 10 – 15 лет.**

За основу базового модуля пилотного завода принималась вначале центрифуга, разработанная URENCO. Однако в 1974 Соединенные Штаты заявили о разработке и первых успешных испытаниях сверхмощных усовершенствованных центрифуг. В связи с этим было принято решение о дополнительных исследованиях возможности использования центрифуг с повышенной производительностью в качестве модуля промышленного предприятия. Выяснилось, что необходимая для таких машин частота вращения ротора столь велика, что невозможно использование металлического барабана ротора, и требуемая длина превышает все мыслимые пределы. Проблема высоких скоростей могла быть решена при использовании волокна из композитных материалов для ротора. Однако и в этом направлении пришлось решать серьёзные проблемы, связанные со специфическими механическими и термодинамическими свойствами композитного волокна. У композитного волокна, несомненно, более высокое отношение прочности к плотности, чем у металла, но это только вдоль волокна, а в поперечном направлении это отношение гораздо меньше. Кроме этого, волокно хуже поддается формовке и обладает слабой термоустойчивостью. Хотя эти факторы замедлили процесс создания машины, разделительная способность и производительность, достигнутые на большой центрифуге, названной 53SSG, намного превысили полученные на металлическом роторе; центрифуга 53SSG в течение длительного времени лидировала по этим параметрам.

Изготовление и испытания большой центрифуги потребовало длительного времени; в 1980 г. были проанализированы технико-экономические показатели центрифуг с большим и меньшим диаметрами, и сравнение оказалось в пользу центрифуги с меньшим диаметром с металлическим ротором. В связи с этим, концепция 1974 года по созданию промышленного предприятия, базировавшаяся на центрифугах больших диаметров, была переориентирована на развитие центрифуг с меньшими диаметрами с металлическим ротором.

Этими центрифугами были оснащены и демонстрационный завод производительностью 200 т ЕРР/год и промышленное предприятие по обогащению урана в Rokkasho Village, производительностью 600 т ЕРР/год.

Однако разработки по созданию центрифуг с ротором из композитных материалов продолжались. В частности, в компании URENCO испытание опытных образцов показали их полную конкурентоспособность в сравнении с центрифугами с металлическим ротором. В связи с этим, в 1986 году некоторые электроэнергетические компании, PNC и JNFI заключили соглашение о сотрудничестве в исследованиях по разработке промышленной центрифуги с ротором из композита.

Композиты использовались в авиации, при изготовлении клюшек для гольфа и удочек; однако, композит, используемый в центрифуге, подвергается воздействию центробежной силы, близкой к пределу прочности материала, которая вызывает вязкоупругую деформацию, свойственную только композитам. Этот эффект, в свою очередь, приводит к потере долгосрочной вращательной устойчивости. Для решения этой проблемы были уточнены и систематизированы данные относительно вязкоупругости материалов, произведена замена некоторых компонент, изменена конфигурация. С помощью аналитических оценок было показано, что время жизни ротора должно быть не меньше десяти лет. Эти и другие проблемы были решены в 1991 году с отставанием от графика на 1 год, и объединенное исследование увенчалось строительством пилотного завода с использованием центрифуг с ротором из композита.

Однако эти исследования не были последними. JNFL и электроэнергетические компании в 1993 году предложили новое совместное исследование опытной центрифуги, которая имела бы более высокую производительность с упрощенной структурой ротора, сравнительно малым отношением длины к диаметру, но с более высокой периферийной скоростью. В свою очередь, PNC провела исследования, позволившие усовершенствовать проект в части, касающейся нагрузок на композиты, усилить затухание вибрации, усовершенствовать технологию балансировки, обеспечившую прохождение центрифугой критических скоростей более высокого порядка, решить проблему разделения потока при большом отношении длины к диаметру, усовершенствовать элементную базу технологии (например, опоры).

Результаты этих исследований привели к созданию центрифуги со сверхвысокой производительностью, успешно прошедшей предварительные испытания. Можно сказать, что разделительная способность этой центрифуги превосходит производительность центрифуги URENCO и имеет почти тот же уровень, что и у сверхцентрифуги, анонсированной Соединенными Штатами в 1974 г.

4. Заключение

Следует отметить, что газовые центрифуги усиленно разрабатывались в США в 70-е и в начале 80-х годов в связи с проблемами, связанными с рентабельностью производства ядерного топлива газодиффузионными заводами. США, со свойственной им традицией не только не повторять существующие аналоги, а занять лидирующие позиции, пошли по пути создания сверхцентрифуг (AGC SET III-VI) производительностью 200 - 600 кг ЕРР/год. Однако этот путь не привёл к намеченной цели: попытка запустить первую очередь завода в Портсмуте не удалась, 1100 центрифуг были демонтированы; заказы на остальные 24 тыс. центрифуг аннулированы, финансирование работ по центрифугам было прекращено.

Однако по последним заявлениям официальных лиц USEC есть намерение продолжить исследования в этом направлении.

В заключении следует ещё раз отметить, что центрифужная технология продолжает оставаться лидером в технологии обогащения урана.

Проблемы, которые в принципе могут когда-либо возникнуть, заключаются в следующем:

- износ оборудования и необходимость массового его возобновления;
- необходимость более глубокого извлечения целевого изотопа;
- необходимость дообогащения обеднённых отвалов;
- ограниченные возможности качественного совершенствования центрифужного метода;
- возможность утраты конкурентоспособности на внешнем рынке услуг при реализации кем-либо более совершенной технологии.

Авторы выражают искреннюю признательность Н.С.Бабаеву, А.А.Сазыкину, Н.Ю.Желтковскому, А.П.Сенченкову за ценные замечания в процессе доклада на конференции, которые были учтены при подготовке к печати доклада в Сборнике.

Литература

1. *Научно-экспериментальная база атомной промышленности зарубежных стран.* Справочник. Под ред. Круглова А.К., Смирнова Ю.В., Москва, Энергоиздат (1987)
2. Круглов А.К. *Как создавалась атомная промышленность в СССР.* Москва, ЦНИИАТОМИНФОРМ (1995)
3. *Advances in Nuclear Science and Technology*, 6, 105 (1972)
4. 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)
5. Прусаков В.Н., Сазыкин А.А.. В сборнике «История Советского Атомного проекта». Под ред. Велихова Е.П., Москва, ИздАТ, 156 (1997)
6. Атомный проект СССР. Под редакцией Л.Д.Рябева, Москва, НАУКА-ФИЗМАТЛИТ. (1998)
7. Chernov A.G., Nikipelov B.V. *Nuclear Europe Worldscan*, No 3-4, 9 (1990)
8. Nikipelov B.V., Vlasov A.A. *Nuaxko* (1991)
9. 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)