

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА И ИХ ОТНОШЕНИЕ К РАСПРОСТРАНЕНИЮ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Александр Глезер

В этой статье представлены аналитическая модель газовой центрифуги, впервые разработанная в 80-х годах, и применение этой модели к определению основных конструкторских и операционных характеристик некоторых гипотетических схем центрифуг. Применяется последовательность моделей типичных установок первого поколения для оценки сценариев важных прорывов, включающих повторную обработку обогащаемого материала или новые соединения каскадов, для естественного или же предварительно обогащенного урана в качестве исходного материала.

Автор работает в Программе “Наука и всеобщая безопасность”, Принстонский университет, Принстон, Нью-Джерси, США

Статья получена редакцией 15 апреля 2008 года и принята к опубликованию 23 июня 2008 года.

Автор благодарит Р.Раджарамана, Хьюстона Вуда и коллег по программе “Наука и всеобщая безопасность” за ценные обсуждения и замечания по ранним вариантам статьи. Автор благодарит также рецензентов за предложения.

Почтовый адрес для корреспонденций: Alexander Glaser, Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau St., Princeton, NJ 08542, USA.

Электронный адрес: aglaser@princeton.edu.

ВВЕДЕНИЕ

Газовые центрифуги для обогащения урана играют все более важную роль в цикле гражданского ядерного топлива. С точки зрения ядерного нераспространения большую тревогу вызывает возможность преобразования гражданской установки по обогащению в предприятие, выпускающее высокообогащенный уран (ВОУ).

В сценарии прорыва, когда преследуется производство ВОУ для оружейных целей, это делается настолько быстро, насколько возможно, без попыток скрыть намерения или действия. Понимание возможности прорыва четко связано с детальными техническими представлениями о функционировании центрифуг и построенных из них каскадов.

Определение основных характеристик газовой центрифуги для обогащения урана представляет собой сложную задачу по нескольким причинам. С аналитической точки зрения, приходится решать две совершенно независимые задачи: профиль течения газа в центрифуге определяется уравнениями гидродинамики, а явления разделения - уравнениями диффузии. Для проведения анализа разделения надо иметь решение гидродинамической проблемы. Но на практике процесс решения изменяется и просто *принимается* идеализированный или оптимальный профиль потока, а затем определяются разделительные характеристики центрифуги. Проблема тогда заключается в том, чтобы разумно совместить две части анализа.¹ При аналитическом подходе надо быть внимательным к влиянию возмущений, вызываемых, например, наличием отводящих трубок и перегородок или ускорением инжектируемого сырья - такими эффектами нельзя пренебрегать в реальных машинах. Наконец, опытно-конструкторские работы по центрифугам стали закрытыми с 1960 года. Поэтому имеется мало данных, чтобы обосновать и изучить пределы подходов, представленных в открытой технической литературе по центрифугам.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ Э. РЭТЦА (1983 ГОД)

Отличный вывод физических принципов газовой центрифуги для разделения урана, доступный в открытой литературе, был проведен Эрнстом Рэтцом в начале 80-х годов. Он ак-

центрировал анализ разделения на использование так называемого двухслойного подхода для профиля осевого потока, чтобы изложить гидродинамику проблемы. В наиболее полном виде этот анализ был опубликован в качестве его диссертации.² Решение начинается с уравнения в частных производных для концентрации отдельной фракции $N(r,z)$ - изотопа, представляющего интерес (мы используем обозначения Козна³). Самый общий вид этого уравнения упрощается для изотермальных равновесных условий ($\partial N/\partial t = 0$), где пренебрегается остаточной радиальной скоростью дрейфа для газа.

$$0 = Dp \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\Delta M}{2RT} \left(\frac{v_a}{a} \right)^2 r^2 N(1-N) + r \frac{\partial N}{\partial r} \right] - pw \frac{\partial N}{\partial z} + Dp \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \quad (1)$$

Здесь a - радиус, а v_a - периферийная скорость ротора центрифуги; $p(r)$ - локальное давление газа, а $w(r,z)$ - аксиальная скорость газа. Для двойной смеси U-235 и U-238 в газе, над которым производится операция $\Delta M = 0,003$ кг/моль. R - это универсальная газовая постоянная, а T - средняя температура газа. Коэффициент самодиффузии D пропорционален $1/\rho$, так что $D\rho = \text{const}$. Для выбранной температуры и при выполнении законов идеального газа произведение $D\rho$ остается постоянной величиной.

$$D\rho = RTD\rho/M = \text{const}, \text{ а } D\rho \approx 2.2 \times 10^{-5} \text{ кг. (м.с)} \quad (2)$$

В уравнении центрифуги (1) первые два члена описывают явления разделения, вызываемые радиальным давлением и обратной диффузией. Последние два члена отвечают за явления, связанные с аксиальным током в ротор и аксиальной обратной диффузией.

Уравнение можно проинтегрировать с выбранными дополнительными предположениями. Для длинных роторов ($Z \gg a$) эффект аксиальной обратной диффузии второго порядка мал и поэтому обычно его игнорируют. Впрочем, предложенные Козном и Рэтцем решения отличаются в одном важном аспекте. Козн с самого начала утверждал, что $\partial N/\partial z$ всего лишь слабо зависит от радиуса и предложил считать эту функцию постоянной величиной при интегрировании по радиусу, что значительно упрощает решение.⁴ Напротив, Рэтц показал, что это предположение в общем случае не выполняется. Поэтому он ввел двухслойный профиль течения, где средние значения $\partial N/\partial z$ определяются отдельно для внутреннего и наружного слоев профиля потока. Выбор радиусов (r_1 и r_2) будет обсуждаться позже. В конце концов, Рэтц вывел аналитическое выражение для различия в концентрации изотопов ($N_P - N_W$) на обоих краях машины длиной Z , работающей в режиме противотока в зависимости от переменных, которые отбираются заранее, либо оптимизируются позднее.⁵

$$N_P - N_W = \frac{\Delta M}{2RT} \left(\frac{v_a}{a} \right)^2 (r_2^2 - r_1^2) N_F(1 - N_F) \left\{ \left(\frac{1 + L/F}{\theta} \right) [1 - \exp(-A_P Z_P)] + \left(\frac{L/F}{1 - \theta} \right) [1 - \exp(-A_W(Z - Z_P))] \right\} \quad (2)$$

где

$$A_P = \frac{2\pi D\rho}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{F} \frac{\theta}{(1 + L/F)(1 - \theta + L/F)}$$

и

$$A_W = \frac{2\pi D\rho}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{F} \frac{(1 - \theta)}{(L/F)(1 - \theta + L/F)}$$

Это решение уравнения центрифуги является основой для всего последующего анализа.

Оно зависит от четырех контролируемых параметров: противоток L и скорость подачи топлива F (обе величины измеряются в кг/с), отсечка θ и длина ректификатора Z_P , которая определяется осевым положением точки подачи исходного материала (сырья).⁶ Характеристическим параметром служит отношение противотока к скорости подачи сырья $k = L/F$, ко-

торое обычно принимает значения между 2 и 4. Характеристики машины могут быть проверены и оптимизированы либо фиксированием отношения противотока к темпам подачи сырья (k), либо фиксированием значения внутреннего противотока L (в этом случае k меняется в результате изменения темпов подачи сырья).

Выбор радиусов двух оболочек

Остающиеся переменные, необходимые для оценки разделительных характеристик машины, - это радиусы r_1 и r_2 эквивалентного профиля с двумя оболочками. Рэтц отметил, что эти радиусы должны быть "выбраны разумным образом," чтобы разделить пополам течения масс в соответствующих потоках, как проиллюстрировано на Рис.1.

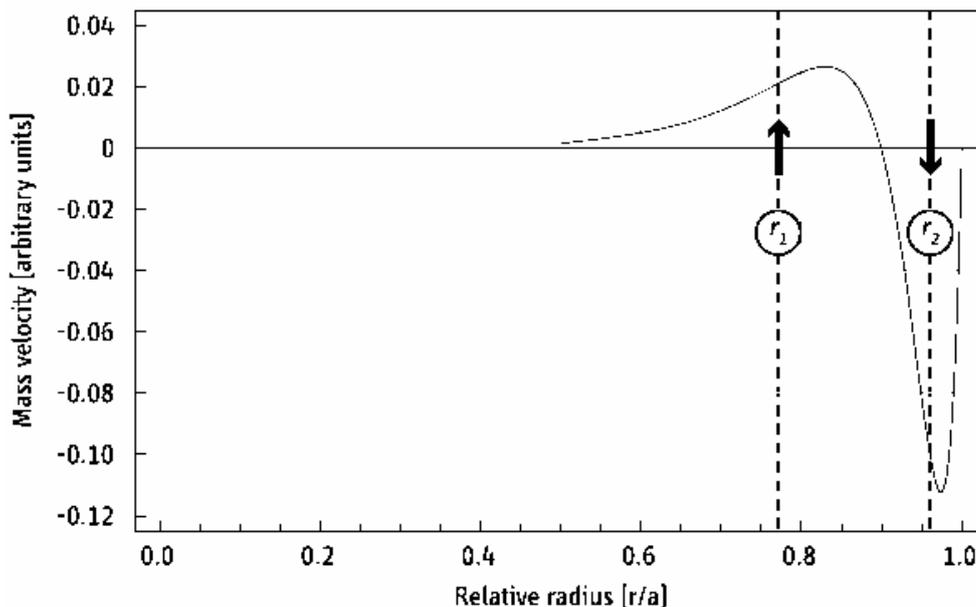


Рис. 1: Типичный профиль массовой скорости, ожидаемый в центрифуге. По оси X отложен относительный радиус (r/a). По оси Y - массовая скорость (единицы произвольные).

Зависимость от радиуса массового течения или профиль массовой скорости ρw , где ρ - плотность, а w - аксиальная скорость газа, в общем случае неизвестна. Требуется решение гидродинамических уравнений, которые (как уже отмечалось выше) полностью независимы от разделительных явлений в машине. Хорошие оценки r_1 и r_2 важны для правильной оценки характеристик машины. Вообще говоря, конструкторы будут пытаться свести к максимуму эффект элементарного (радиального) разведения потока продукта через внутренности машины, но такая стратегия может быть ограничена в связи с низким давлением в этой области. Рэтц показал, что оптимальное для вывода соотношение радиусов получается, когда принимает максимальное значение следующее выражение:⁷

$$\max \left\{ \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^2 \times \left[\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \right]^{-1} \right\} \rightarrow \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \approx 0.534 \quad (4)$$

Для разных практических целей, однако, эффективный радиус вывода также ограничен соотношением давления χ , скажем, 1000:1. Для быстрых машин отношение радиусов r_1/r_2 будет определяться скорее этим соотношением давлений, чем уравнением (4). Применяя фундаментальные барометрические уравнения для распределения радиального давления в машине, получаем:⁸

$$\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \approx \left(\frac{r_1}{a}\right) = \sqrt{1 - \frac{2RT}{M} (\ln x) \frac{1}{v_a^2}} \quad (5)$$

Здесь M - молярный вес газа UF_6 , участвующего в процессе (0.352 кг/моль), а все остальные переменные уже были определены ранее. Для обычной температуры и для $x = 1000$ оптимальное отношение радиусов из уравнения (4) может быть использовано до периферических скоростей около 380 м/с; выше этих скоростей практическое значение отношения радиусов определяется из уравнения (5). На Рис.2 показано, как отношение радиусов зависит от скорости ротора.

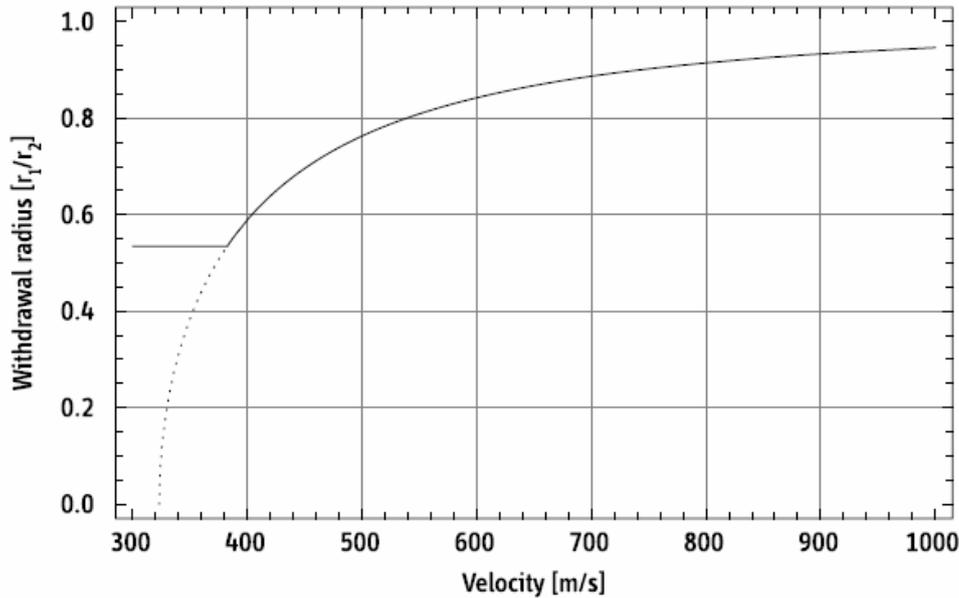


Рис. 2: Оптимальное соотношение радиусов при выпуске как функция периферической скорости. По оси X отложена скорость (м/с). По оси Y - отношение радиусов при выпуске.

В результате этого эффекта (опустошения внутренней части машины) характеристики очень быстрых центрифуг возрастают только с $\delta U \sim v^2$ вместо $\delta U \sim v^4$, что теоретически предсказано в решении Дирака для максимальной характеристики разделения центрифугой:⁹

$$\delta U_{\text{Dirac}} = D\rho \left(\frac{\Delta M v_a^2}{2RT} \right)^2 \frac{\pi Z}{2} \quad (6)$$

Наконец, необходимо оценить r_2 . Впрочем, даже для относительно медленных машин, как показано на Рис. 1, r_2 будет находиться очень близко к внешнему радиусу ротора a . Для центрифуг, обсуждаемых далее, использованы значения между 0.96 и 0.99.

Разделительная мощность

Разделительная мощность обогащающего элемента в общем виде определяется следующим образом:

$$\delta U = PV(N_P) + W V(N_W) - FV(N_F) = F[\theta V(N_P) + (1 - \theta)V(N_W) - V(N_F)] \quad (7)$$

Здесь F, P и W - это потоки сырья, продукта и отходов, выражаемые, например, в кг/год, а

N_X - соответствующая фракция U-235 в этих потоках. Отсечка θ определяется просто из соотношения $P=\theta F$, откуда сохранение масс требует, чтобы $W=(1-\theta)F$. Так называемая "функция ценности" $V(N)$ на этом этапе заранее еще не известна. Полезное выражения для разделительной мощности можно получить разложением в ряд Тэйлора уравнения (7) вблизи N_F .

Члены нулевого и первого порядка обращаются в нуль из-за сохранения общей массы и количества U-235. Член второго порядка можно записать в виде:

$$\delta U \approx \frac{1}{2} F \theta (1 - \theta) (N_P - N_W)^2 V''(N_F) \quad (8)$$

Разделительная мощность обогащающего блока по определению не должна зависеть от конкретного материала, подвергаемого процессу. Можно показать, что это требование определяет $V''(N_F)$ следующим образом :¹⁰

$$V''(N_F) = \left[\frac{1}{N_F(1 - N_F)} \right]^2 \quad (9)$$

В ходе последующих действий, когда решение уравнения (3) вводится в уравнение (8) и комбинируется с уравнением (9), концентрация сырья N_F выпадает. После приведения в соответствующий вид характеристика разделения может быть выражена в следующем виде

$$\begin{aligned} \delta U_{\text{Rietz}}(L, F, \theta, Z_P) = & \frac{1}{2} F \theta (1 - \theta) \left(\frac{\Delta M}{2RT} v_a^2 \right)^2 \left(\frac{r_2}{a} \right)^4 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^2 \\ & \times \left[\left(\frac{1 + L/F}{\theta} \right) (1 - \exp[-A_P(L, F, \theta)Z_P]) \right. \\ & \left. + \left(\frac{L/F}{1 - \theta} \right) (1 - \exp[-A_W(L, F, \theta)(Z - Z_P)]) \right]^2 \end{aligned} \quad (10)$$

где $A_P(L, F, \theta)$ и $A_W(L, F, \theta)$ определены ранее. Уравнение (10) - это важный аналитический результат для определения характеристики центрифуги. Обратите внимание, что нет необходимости определять функцию ценности саму по себе для этого вывода δU . Основываясь на определении $V''(N)$ из уравнения (8), можно установить решение для $V(N)$. Это стандартное выражение будет применяться дальше при анализе.

$$V(N) = (2N - 1) \ln \left(\frac{N}{1 - N} \right) \quad (11)$$

Разделительная мощность δU , определенная уравнением (10), является функцией противотока, темпов подачи сырья, отсечки и длины ректификатора. Другие параметры машины отбираются заранее, но их можно рассматривать также и как переменные. Это радиус ротора a , периферическая скорость v_a , полная длина ротора Z и средняя рабочая температура T . Радиусы r_1 и r_2 придется подбирать, если меняется скорость, Положение точки ввода сырья, то есть, длина ректификатора также должно быть отобрано на стадии конструирования машины. Анализы показывают, что оптимальная длина ректификатора Z_P^* зависит от отношения противотока и темпов подачи сырья L/F , а также от отсечки θ , и дается следующим выражением;¹¹

$$Z_P^* = \frac{(1 - \theta)(1 + L/F)}{1 - \theta + L/F} Z \quad (12)$$

Соответственно, при $\theta = 0.5$ и $L/F = k = 1$ оптимальная длина ректификатора составит 2/3 его полной длины и близка к 1/2 для более высоких значений k . Только в условиях полного отлива ($k \rightarrow \infty$) ректификатор и стриппер имеют одинаковую длину. Уравнение (12) можно вставить в уравнение (10) при оптимизации конструкции машины.

Коэффициент разделения

Максимум разделительной мощности δU для центрифуги - это основная цель процессов конструирования и оптимизации. Как будет показано далее, впрочем, оптимум δU может быть достигнут (и машина будет работать) при более широких темпах подачи сырья в зависимости от величины противотока, стабилизируемого в машине.

Иногда разделительная мощность машины характеризуется как функция всех конструктивных и операционных параметров, но чистый эффект сырьевого материала можно количественно определить с помощью коэффициента обогащения α и коэффициента истощения β ,

$$\alpha = \frac{N_P/(1 - N_P)}{N_F/(1 - N_F)} \quad \text{and} \quad \beta = \frac{N_F/(1 - N_F)}{N_W/(1 - N_W)} \quad (13)$$

Благодаря сохранению массы урана и полного содержания U-235 знание одного из этих коэффициентов подразумевает знание второго. Точно так же можно описать эффект обогащающей ячейки коэффициентом разделения $\alpha\beta$, который определяется как просто произведение α на β ,

$$\alpha\beta = \frac{N_P/(1 - N_P)}{N_W/(1 - N_W)} \quad (14)$$

Коэффициенты обогащения и истощения, которые требуются для конструирования обогащительного каскада, неявно определяются из уравнений (7), (10) и (11), как только определена отсечка (ступень) и использованы уравнения сохранения для всего урана и для U-235, входящих в машину (ступень) или покидающих ее.

$$\alpha(\delta U, F, \theta, \dots) \quad \text{and} \quad \beta(\delta U, F, \theta, \dots) \quad (15)$$

Дальнейшие сведения, представленные далее, иллюстрируют зависимости разделительной мощности δU и коэффициента разделения $\alpha\beta$ как функций выбранных темпов подачи сырья.

КОНСТРУКЦИИ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТОБРАННЫХ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАШИН

Несколько конструкций центрифуг сыграли важные исторические роли в качестве “базовых конструкций” для дальнейших разработок или копирования в разных местах. Другие машины используются сейчас в коммерческих целях или разрабатываются для применения на новых предприятиях с центрифугами, которые сооружаются или планируются в Бразилии, Иране, Франции или Соединенных Штатах. В Таблице 1 приведены оценки конструктивных характеристик важных поколений центрифуг, а приведенные ниже обсуждения обеспечивают некоторые информационные предпосылки о выбранных машинах, объясняя отдельные оценочные цифры, приведенные здесь. Для удобства использованы общепринятые сокращенные названия (P-1, P-2 и т.д.) для обозначения этих машин.

Таблица 1: Оценочные конструктивные характеристики важных поколений центрифуг

Тип	Оригинальная машина	Период развертывания	Характеристики ротора				Разделительная мощность
			Материал	Скорость	Диаметр	Длина	
P-1	Zippe	1940-50	Алюминий	350 м/с	7,4 см	0,3 м	0,4 ЕРР/г
	SNOR/CNOR	1960-70	Алюминий	350 м/с	10 см	2,0 м	2-3 ЕРР/г
P-2	G-2	1960-70	Спецсталь	485 м/с	15 см	1,0 м	5-6 ЕРР/г
P-3	4-M	начало	Спецсталь	(485 м/с)	?	2,0 м	12 ЕРР/г
P-4	SLM (TC-10)	1980	Спецсталь	500 м/с	15 см	3,2 м	21 ЕРР/г
	TC-11	конец	Углепластик	(600 м/с)	?	(3,0 м)	?
	TC-12	1980	Углепластик	(620 м/с)	(20 см)	(3,0 м)	40 ЕРР/г
	TC-21	конец	Углепластик	(770 м/с)	(20 см)	(5,0 м)	100 ЕРР/г
	AC-100	1980	Углепластик	(900 м/с)	(60 см)	(12,0 м)	330 ЕРР/г
			1990 2000 2000				

* Величины в скобках являются оценками автора.

Тип P-1: Машины P-1 основаны на ранних голландских конструкциях, обозначаемых SNOR and CNOR (научный и культивированный ядерный орбитальный ротор)¹², которые были разработаны на начальных фазах проекта Urenco и применялись на голландском опытном заводе SP1. Роторы оригинальных голландских машин состояли из шести сегментов, в то время как P-1 использовал, по-видимому, только четыре, уменьшив их длину до размера, слегка меньшего, чем 2 метра. Как говорят, каждый сегмент вносил 0.5 ЕРР/год в общую разделительную мощность CNOR и конструкции P-1.¹³ Во всех конструкциях применялся алюминиевый ротор, что ограничивало периферийную скорость до величины около 350 м/с. Сообщалось, что диаметр ротора у P-1 находился в пределах 10-11 см.¹⁴ В интервью (апрель 2006 года) иранское официальное лицо подтвердило многие детали конструкции P1 (IR-1): таким образом, длина его ротора равна 180 см, диаметр ротора составляет 10.5 см, а периферическая скорость равна 350 м/с.¹⁵ Длина ротора также совпадает с фотографиями каскадов, установленных на иранском опытном заводе и на иранских заводах по обогащению топлива.

Тип P-2: На основе публично доступной информации P-2 - это слегка измененная версия центрифуги G-2. Сама G-2 была немецкой конструкцией, разработанной до проекта Urenco и использовавшей стальной ротор с двумя сегментами.¹⁶ G-2 является сверхкритической машиной и она в два раза длиннее первоначальной, подкритической машины (G-1) с одним сегментом. Часто сообщавшаяся длина ротора 1,0 м для G-2 и P-2 совпадает с доступными фотографиями оригинальной машины. Размеры в диапазоне 14.5 см и 15.0 см сообщались о диаметре ротора G-2.¹⁷ G-2 применялась на немецком опытном заводе SP2 и на демонстрационном голландском заводе B21. Применение высокопрочной стали для ротора центрифуги позволило повысить периферическую скорость до 500 м/с. Для справки отметим, что в Таблице 1 указана скорость 485 м/с для большинства машин, использующих сталь. Разделительная мощность P-2 оценивается в 5-6 ЕРР/год.

Публично доступная информация о других машинах, помещенных в Таблице 1, страдает

большей неопределенностью. Однако особенности могут быть оценены на основе известных характеристик более старых машин и сделанных улучшений по сравнению с ними. Данные о конструкции и рабочих характеристиках (и даже само их фактическое существование) продвинутых пакистанских центрифуг Р-3 и Р-4 большей частью основаны на докладах М.Хиббса.¹⁸ Основная гипотеза заключается снова в том, что обе машины основаны на конструкциях, рассмотренных Urenco в конце 70-х и начале 80-х годов.

Тип Р-3: Как следует из сообщения голландского правительства, пакистанский ученый А. Хан мог иметь доступ к конструкции продвинутой центрифуги, называвшейся 4-М, которая разрабатывалась в Голландии в начале 70-х годов.¹⁹ Из доступной информации можно предположить, что 4-М является машиной с четырьмя сегментами, высотой 2 м,²⁰ и, по-видимому, имеет ротор, изготовленный из специальной стали. Разделительная мощность Р-3, как сообщается, ниже 12 ЕРР/год.²¹

Тип Р-4: По данным западных разведывательных служб предполагается, что Пакистан разработал продвинутую центрифугу в середине 80-х годов. Эта машина основана на конструкции голландской Urenco, называлась SLM, а позднее стала известна как ТС-10.²² Сообщается, что диаметр ротора равен 14,5 см, а длина - 3.2 м, и машина работает со скоростью 508 м/с. Разделительная мощность Р-3, судя по сообщениям, доходит до 21 ЕРР/год. Другие машины приведены в Таблице 1 для иллюстрации потенциала продвинутой технологии центрифуг. Оценки конструкции машины Urenco и параметров ее характеристик базируются на информации, предоставленной Urenco в ряде брифингов и статей.²³ В документах опубликованы графики, где указаны разделительная мощность, периферическая скорость и длина ротора машин Urenco в относительных единицах в зависимости от поколения центрифуги. Отдельные сведения, которые известны с разумным доверием, позволяют определить абсолютные значения на осях этих графиков. В частности, для ТС-12, машины четвертого поколения было определено, что ее разделительная мощность составляет 40 ЕРР/год.²⁴ Часто упоминается, что ее длина около 3 м. Максимальная скорость сделанных полностью из металла (специальная сталь) машин ограничена примерно 500 м/с. В соответствии с опубликованными изображениями использование композитов дало возможность повысить скорость в 1.2 раза для машин третьего поколения и в 1.5 раза для наиболее продвинутых конструкций (шестое поколение), которые будут тогда соответствовать 600 и 750 м/с, соответственно.

Наконец, помещены оценки конструкции и рабочих характеристик *Американской центрифуги* (АС100). Разработчики этой машины, которая является кандидатом к развертыванию на новом американском обогатительном предприятии, определили многие особенности машины. В ней используются конструкции, разработанные в 70-х и начале 80-х годов.²⁵ Разделительные характеристики АС100 были установлены в диапазоне 330-350 ЕРР/год.²⁶ Известные размеры машины можно применить к оценке скорости ротора, которая сходится с опубликованными характеристиками АС100.

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ МАШИН

Конструкторские данные гипотетических центрифуг и рабочие характеристики, рассчитанные с использованием представленного ранее формализма, суммированы в Таблице 2. Максимальная разделительная мощность каждой из этих машин может быть определена на основе уравнения (10), как только определятся периферическая скорость и размеры ротора, а также отобрана адекватная комбинация отношения радиусов. Максимальная производительность δU_{Raeiz} достигается для определенного темпа подачи сырья F^* . Оптимальная подача сырья и поэтому коэффициент разделения машины, однако, меняются в зависимости от выбранного отношения противотока и потока сырья.

Типичные значения отношения противотока и потока сырья k лежат между 2 и 4. Значение k определяет максимальные темпы подачи сырья. Для заданной максимальной разделительной мощности центрифуги эффективный коэффициент разделения тогда изменяется обратно пропорционально темпам подачи сырья. Рис. 3 иллюстрирует зависимость двух конструктивных точек машины типа Р-1. Соответственно, типичные темпы подачи сырья для Р-1 лежат в диапазоне 4.0-13.5 мг/с, что соответствует коэффициентам разделения 1.48 и 1.26, соответственно.

ПРОСТАЯ МОДЕЛЬ

ПЕРЕХОДНОЙ РЕАКЦИИ ЦЕНТРИФУГ

Равновесные характеристики центрифуг, включая разделительные свойства и относящиеся к ним темпы подачи сырья, можно определить при помощи представленной выше методологии. Здесь используется очень простая математическая модель для описания переходной реакции машины, которая основана на следующих допущениях:

- Темпы выхода машины (потоки продукта и отходов) определяются текущим запасом UF_6 . Иными словами, даже если темпы подачи сырья изменятся постепенно или мгновенно, потребуется некоторое время для установления новых темпов выхода. В равновесных условиях запас UF_6 в центрифуге и соответствующее давление на стенки определяются поэтому темпами подачи сырья.
- Разделительные характеристики определяются текущими темпами подачи сырья. В частности, если внутренняя циркуляция поддерживается постоянной, машина работает не в оптимальном режиме, пока темпы подачи сырья не примут оптимального значения. Это основано на анализе Рэтца и продемонстрировано на Рис.3.

Как только эти величины подсчитаны, можно будет также определить уровни обогащения продукта и отходов, выходящих из машины, как функции времени. На Рис. 4 показана реакция машины типа P1 (P1-100) на постепенное понижение темпа подачи сырья от ошибочно выбранного значения 10 мг/с для внутренней циркуляции до 5 мг/с. Предполагаемый начальный запас UF_6 составляет около 3.5 г, что совместимо с давлением на стенку около 100 торр.²⁹ Как ясно из Рис. 3, разделительная характеристика ухудшается меньше, чем на 10%, даже при таком 50%-ном сокращении темпов подачи сырья. Соответственно, например, обогащение продукта, выходящего из машины, возрастает даже не при оптимальных рабочих условиях. В этом примере новые равновесные условия устанавливаются примерно через час. Это значение совместимо с тем, что получено при помощи более продвинутых подходов к модели переходного поведения центрифуг, где рассматриваются не только баланс массы, но и некоторые физические явления.³⁰

Таблица 2: Конструктивные и рабочие характеристики гипотетических центрифуг. Уравнение (6) определяет теоретическую максимальную производительность δU_{Dirac} . Полная эффективность и эффективная разделительная производительность δU_{Raetz} могут быть определены уравнением (10), как только выберется отношение радиусов. Оптимальные темпы подачи сырья F^* и коэффициент разделения $\alpha\beta$ зависят от выбранного отношения противотока и потока сырья k . Все величины рассматриваются при $T = 320$ К и $\theta = 0.50$; скорость для машины типа P1 уменьшена до 320 м/с.

	Стандарт 1 (тип P-1)	Стандарт 2 (тип P-2)	Улучшенный 1 (GSR)	Улучшенный 2	Улучшенный 3
v_a (м/с)	320	485	600	750	750
Z (см)	180	100	200	500	1000
D (см)	10	15	20	20	60
δU_{Dirac} (ЕРР/год)	5.0	13.0	60.7	370	740
r_1 / r_2	0.534	0.746	0.843	0.902	0.902
Эффективность	0.564	0.465	0.340	0.263	0.263
δU_{Raetz} (ЕРР/год)	2.5	6.0	20.6	97	195
<i>Отношение противотока к потоку сырья k=2.0</i>					
F^* (мг/с)	12.6	15.0	51.4	214	429
$\alpha\beta$	1.29	1.39	1.39	1.41	1.41
<i>Отношение противотока к потоку сырья k=3.0</i>					
F^* (мг/с)	6.4	7.7	26.2	109	219
$\alpha\beta$	1.40	1.54	1.54	1.58	1.58
<i>Отношение противотока к потоку сырья k=4.0</i>					
F^* (мг/с)	3.9	4.6	15.9	66	132
$\alpha\beta$	1.52	1.70	1.70	1.74	1.74

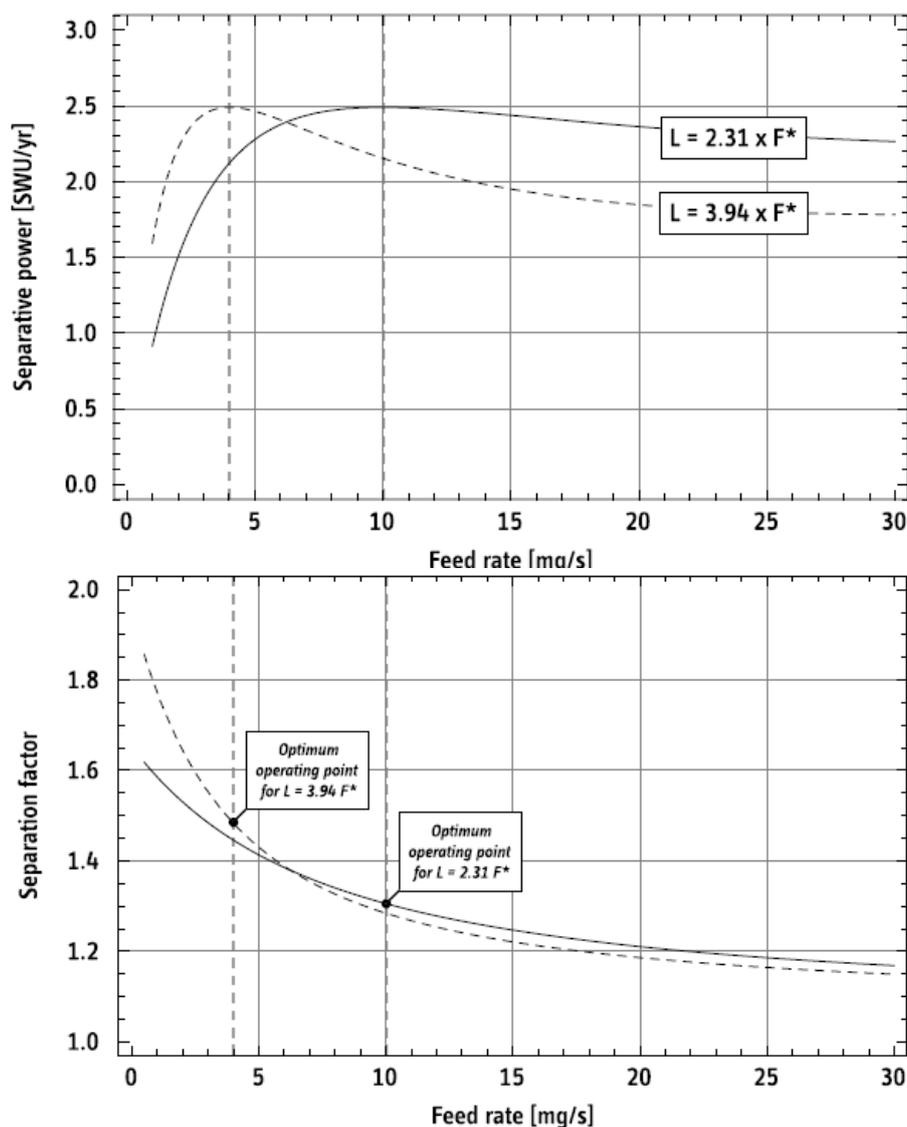


Рис. 3: Разделительная характеристика машины типа P1 как функция темпов подачи топлива для фиксированной внутренней циркуляции (сверху). Значения для величины противотока L изменяются так, чтобы δU имело максимум при 10 мг/с (P1-100) и при 4 мг/с (P1-040). Эти проектные точки используются для анализа характеристик каскада (смотрите дальше) Также приведены соответствующие коэффициенты разделения (внизу). Результаты основаны на аналитической модели Рэтца с использованием уравнения (10). На верхнем графике по оси X отложены темпы подачи сырья (мг/с), а по оси Y - разделительная мощность (ЕРР/год). На нижнем графике по оси X отложены темпы подачи сырья (мг/с), а по оси Y - коэффициент разделения. Текст в рамках: оптимальная рабочая точка для ...

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАСКАДА ИЗ 164 МАШИН

Рассмотрим каскад из 164 центрифуг для анализа характеристик каскада и его реакции на характеристики сырья (скорость подачи и обогащение). Конструкцию этого каскада, являющегося основным рабочим блоком иранской обогатительной программы, можно явно отследить в Пакистане и Германии.³¹ В ранее упомянутом интервью³² Аквазадежа уточняются дальнейшие детали каскада: он характеризуется 15 ступенями; сырье вводится в пятую ступень, куда входят 24 центрифуги. Ответственный сотрудник также привел значения подачи сырья и выхода продукта (70 и 7 г/час, соответственно) и степень обогащения продукта 3.5%, которая была достигнута в то время.³³ Приведенные темпы производства продукта предполагают, что в последней ступени принимает участие всего одна центрифуга. На осно-

ве такой информации и с помощью стандартных формул для идеальных каскадов³⁴ можно получить правдоподобный вид каскада (Рис. 5).

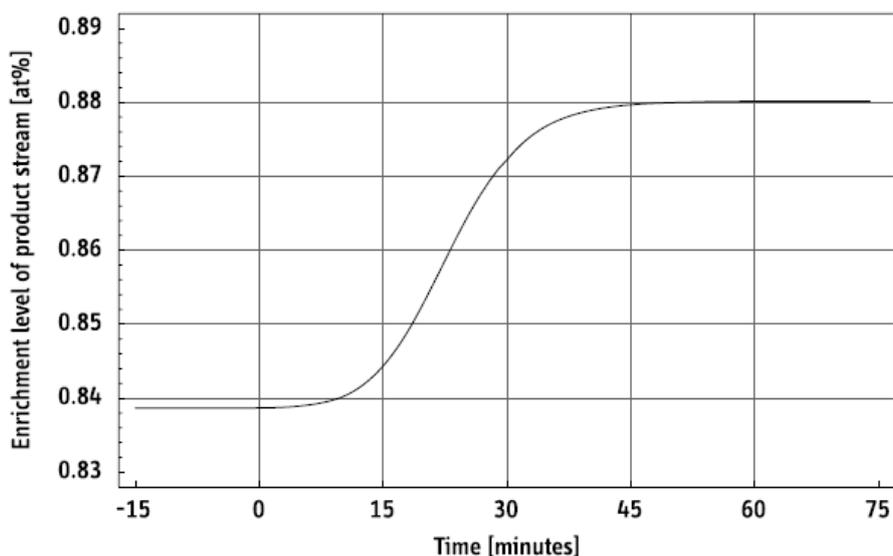


Рис. 4; Уровень обогащения потока продукта, выходящего из центрифуги тип Р1 (Р1-100). В момент времени $t = 0$ темпы подачи сырья постепенно уменьшаются от своего установленного значения 10 мг/с до 5 мг/с в течение 30 минут. Разделительная характеристика слегка уменьшается от оптимального значения (2.5 ЕРР/год) примерно до 2.3 ЕРР/год, если не настроена внутренняя циркуляция. Новое равновесие достигается примерно в течение одного часа. В этом моделировании материалом сырья был естественный уран, а отсечка (θ) равна 0.46.

Моделирование характеристик каскада и его эксплуатационных качеств основано на аналитическом решении Рэтца (уравнение (10)) и на простой численной модели переходной реакции центрифуги на изменения темпов подачи сырья и его обогащения. Эти базовые модели центрифуг позволяют моделировать стандартные (симметричные) обогатительные каскады, где поток продукта питает следующую ступень, а поток отходов поступает в предыдущую ступень.³⁵

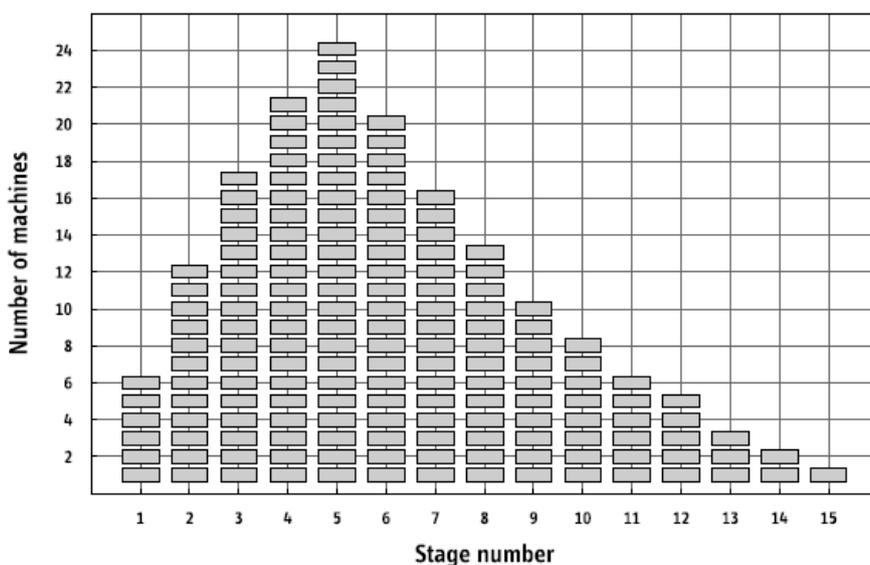


Рис. 5 : Возможное размещение 164 центрифуг в каскаде из 15 ступеней. По оси X отложены номера ступеней, а по оси Y - количество центрифуг.

Эта модель каскада базируется в чистом виде на балансе масс всего урана и U-235, которые распределяются между ступенями. В моделировании для всех ступеней применяется отсечка $\theta = 0.46$. Это значение близко к величине для идеального симметричного каскада.

Основные результаты всех моделирований суммированы в Табл. 3, где помещены производительность и степень обогащения для нескольких машин типа P1. Кроме стандартных операций с использованием естественного урана в виде сырья, приводятся также уровни обогащения для первого режима повторения программы. Указаны результаты для машин, использованных в этом каскаде, причем каждая оптимизирована на различные темпы подачи сырья.

Вариации темпов подачи сырья, как ожидается, приведут к достаточно отличающимся уровням обогащения, чем те, какие получены в этом referense каскаде. Как предсказывает моделирование, уровень 3.5% достигается с максимальными темпами подачи сырья в центрифуге, равными 13.5 мг/с (P1-135), а при уменьшенной подаче в 4.0 мг/с (P1-040) продукт имеет степень обогащения 5.7%. Приведены еще два кандидата на конструктивные точки. Годовая производительность каскада пропорциональна темпам подачи сырья. Могут быть достигнуты темпы годовой производительности от 34 до 113 кг чистого урана на одном каскаде 164 центрифугами с технологией уровня P-1.

Дополнительно к результатам при равновесном состоянии для этого каскада и к различным типам машин особый интерес вызывает переходная реакция системы на изменения в темпах подачи сырья или в уровне его обогащения (например, режим повторения программы). Результаты такого моделирования приведены на Рис. 6. В зависимости от выбранной конструктивной точки, которая определяет оптимальные темпы подачи сырья, новое равновесие достигается в течение 4-48 часов для центрифуг типа P-1. Эти времена коротки по сравнению с типичными временами, характерными для сценария прорыва, как будет обсуждаться в следующем разделе.

Оценка сценария прорыва

Результаты представленных выше моделирований могут быть использованы для определения правдоподобия и относительной важности различных сценариев прорыва. В этой ситуации владелец или оператор охраняемой установки отказывается от соглашения по мирному использованию и начинает производить высоко обогащенный уран для военных целей настолько быстро, насколько возможно, не пытаясь скрывать эти намерения или действия.

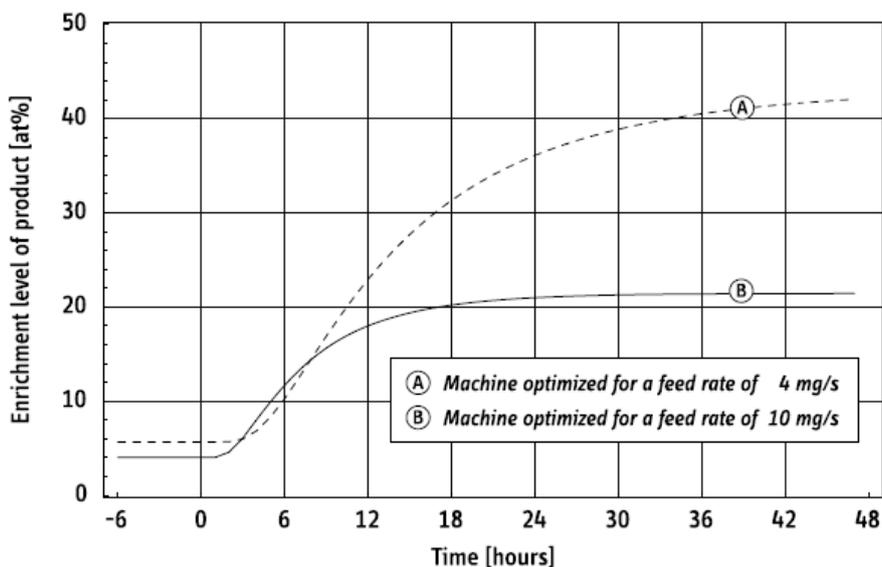


Рис. 6: Переходная реакция каскада из 164 центрифуг, использующих технологию типа P-1. Уровень обогащения продукта в режиме повторения программы инициирован при $t = 0$. В зависимости от выбранных default темпов подачи сырья новое равновесие достигается через 24-48 часов. По оси X отложено время (в часах). По оси Y - уровень обогащения продукта (%). Кривая A относится к центрифуге, оптимизированной на темпы подачи 4 мг/с. Кривая B - к центрифуге, оптимизированной на 10 мг/с.

Таблица 3: Результаты моделирования для каскада из 164 машин, использующего 164 центрифуги типа P1. Существуют четыре режима операций, где каждый характеризуется конкретными темпами подачи сырья F^* в машину, которые транслируются в соответствующие внешние темпы подачи сырья и продукта, а в конечном итоге определяют уровни обогащения продукта, выходящего из каскада. Приведены также разделительная характеристика каскада (SP-C) и ее доля, приходящаяся на усредненную машину (SP-AM). Величины для режима повторения программы предполагают сырье с уровнем обогащения 3.5%, изначально полученное на P1-135, и требуют 120 часов операций.

	164 P1-040	164 P1-044	164 P1-100	164 P1-135
L/F*	3.94	3.73	2.31	1.92
F* (мг UF ₆ /с)	4.00	4.40	10.00	13.50
Сырье	15.36	16.90	38.40	51.84
Продукт	1.57	1.73	3.93	5.31
Отходы (мг UF ₆ /с)	13.79	15.17	34.47	46.53
Сырье	328	360	819	1105
Продукт	34	37	84	113
Отходы (кг U/год)	294	323	735	992
<i>Стандартная операция</i>				
Сырье	0.720%	0.720%	0.720%	0.720%
Продукт	5.672%	5.517%	4.022%	3.498%
Отходы	0.165%	0.173%	0.343%	0.403%
SP-C(EPP/r)	389	393	408	405
SP-AM	2.37	2.40	2.49	2.47
<i>Режим повторения программы (первый цикл: используется сырье с обогащением 3.5%)</i>				
Сырье	не рассматривается	не рассматривается	не рассматривается	3.498%
Продукт				16.309%
Отходы				2.037%
<i>Режим повторения программы (второй цикл: используется сырье с обогащением 16.3%)</i>				
Сырье	не рассматривается	16.309%	не рассматривается	не рассматривается
Продукт		91.089%		
Отходы		7.568%		

Рассмотрим две стратегии: простое повторение программы и объединение каскадов с частичной реконфигурацией.³⁶ Результаты покажут, что полная реконфигурация каскадов в один, предназначенный для производства ВОУ, не является необходимой, так как не увеличивает эффективности процесса и, похоже, займет больше времени, чем частичная реконфигурация. Оба случая предполагают, что несколько каскадов с 164 центрифугами, будут доступны поначалу, а материалом, который будет использован для прорыва, окажутся либо естественный уран, либо достаточно большой запас предварительно обогащенного НОУ (3.5%). Целью является производство ВОУ оружейного качества с уровнем обогащения 95 % или выше.

Повторение программы

Это самый грубый подход, поскольку значительные количества обогащенного материала остаются, по крайней мере, временно, выброшенными из процесса. Сценарий предполагает, что сами каскады остаются неизменными, Поэтому необязательно проводить переделку систем трубопровода, что может уменьшить полное время, требуемое для осуществления стратегии, и способно компенсировать низкую эффективность самого процесса. Чтобы еще более увеличить уровни обогащения, можно уменьшить темпы подачи сырья в некоторых или всех каскадах.

По крайней мере, два цикла повторения программы необходимы, чтобы достигнуть

уровня обогащения 90% или выше в каскаде, первоначально сконструированном для получения урана с обогащением 3.5% из естественно урана. Производительность каскада в первом цикле повторения программы должна быть настолько высокой, насколько возможно, чтобы обеспечить достаточное количество сырья для второго цикла. Если основываться на каскадах типа P1, помещенных в Табл. 3, одним из возможных вариантов было бы воспользоваться каскадом P-135, чтобы пройти от 3.5% до 16.3%, а затем каскадом P1-044 - от 16.3% до оружейного качества (91.1%). Переходной режим приведен на Рис. 7. Равновесное время составляет около четырех дней, то есть, оно еще мало по сравнению с временами, требуемыми для любой смены трубопроводов. Необходимо иметь три каскада P1-135, чтобы обеспечить сырье для одного каскада P1-044. Если применять естественный уран для сценария прорыва, то потребуются больше каскадов для получения 3.5%-ного обогащенного сырья. Эффективные темпы производства и требования на сырье резюмируются ниже.

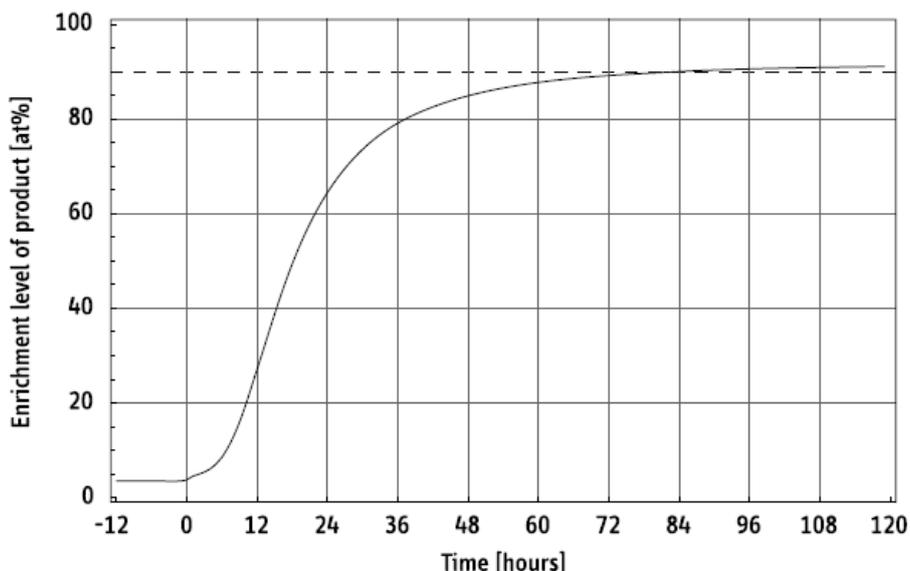


Рис. 7; Уровень обогащения продукта, полученного от каскада из 164 машин второго этапа повторения программы. Машины в каскаде работают при пониженных темпах подачи сырья (P1-044); запас сырья обогащен до 16.3% на первом этапе повторения программы, где машины работают при стандартном темпе подачи сырья (P1-135). В этом моделировании намечавшаяся цель - уровень обогащения 90%, достигается примерно через 3.5 дня. По оси X отложено время (часы), по оси Y - уровень обогащения продукта (%).

Объединение каскадов с частичной реконфигурацией

При этом подходе, который в прошлом был использован ядерными державами для производства урана оружейного качества,³⁷ несколько каскадов соединяются последовательно, образуя другой каскад. Продукт одного каскада служит сырьем для другого, а отходы проходят новый цикл в лежащем ниже каскаде. В идеале никакой материал не пропадает и не происходит смешивания. Следующая оценка основана на пакистанской конструкции каскада, которая, по-видимому, была предложена для ливийского проекта по производству урана оружейного качества. В документе южноафриканского суда (смотрите ссылку 31) отмечается:

Завод спроектирован для производства этого материала в три этапа:

- Два каскада, C1 и C2, каждый из которых содержит по 1968 центрифуг, будут обогащать параллельно естественный уран до 3.5%;
- Каскад HC-01, состоящий из 1312 центрифуг, будет обогащать 3.5%-ный материал до 20%;
- Каскад HC-02, состоящий из 456 центрифуг, будет обогащать 20%-ный материал до 60%;

- Каскад HC-03, состоящий из 128 центрифуг, будет производить конечный продукт с 90%-ным обогащением.

Как отмечалось, разумно предположить, что первая группа каскадов (C1 и C2) - это расширенные, но по сути идентичные версии стандартного каскада с 164 машинами; эти каскады были сконструированы для того же типа центрифуг (P1), вырабатывали обычный уровень обогащения (3.5%) и состояли из машин, число которых кратно 164 (12x164=1968). Напротив, все каскады типа HC, число центрифуг в которых составляет треть от полного количества машин (1896 из 5832), вообще говоря, требуют других конфигураций.³⁸ На Рис. 8 приведена конфигурация, а дальнейшие данные об этой стратегии обогащения суммированы в Табл. 4. Для сценария прорыва, начинающегося с естественного урана, используется 5832 центрифуги, а для сценария, стартующего с предварительно обогащенного урана, требуются только каскады типа HC.

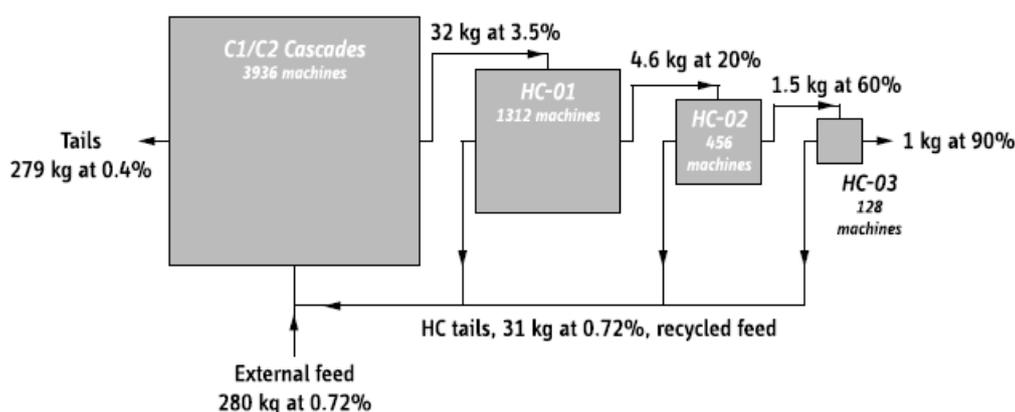


Рис. 8: Иллюстрация устройства каскада, предложенного для ливийского обогатительного проекта. Обратите внимание на асимметричные подсоединения отдельных HC-каскадов. Значения масс нормализованы на 1 кг продукта (уран оружейного качества с обогащением 90%), который производится примерно за 4.1 дня, если установка основана на технологии типа P1.

Сравнение режимов повторения программы и объединения каскадов

Основываясь на данных, подытоженных в Табл. 3 и 4, можно сравнивать эффективности обоих подходов. В каждом случае предполагается, что начальной точкой прорыва может стать естественный или предварительно обогащенный уран. Основные результаты суммируются в Табл. 5 и 6.

Сценарий прорыва с естественным ураном. Это менее надежный сценарий, потому что обогащение материала до 3.5% требует большей части возможностей и вероятно может быть выполнено до прорыва. Стратегия повторения программы исключительно неэффективна по сравнению с объединением каскадов, так как большинство сырья пропадет в качестве отходов в последующих циклах повторения программы. Конкретно, повторение программы требует почти в 100 раз (33 тонны по сравнению с 280 кг на кг продукта) больше урана, чтобы произвести менее половины ВОУ.

При объединении каскадов производится 88.5 кг урана оружейного качества в год, если возможности разделения оцениваются в 2.5 ЕРР в год на центрифугу. Возможный недостаток объединения каскадов по сравнению с повторением программы будет связан с необходимостью перестроить конфигурацию почти трети существующих машин (1892 из 5832). С учетом исключительной неэффективности повторения программы маловероятно, чтобы эта задержка компенсировала более высокую производительность объединения, даже если реконфигурация займет несколько месяцев.

Прорыв с сырьем, предварительно обогащенным до 3.5%. Повторение программы становится гораздо более привлекательным, если в наличии имеется заранее обогащенный материал, поскольку большие количества обогащенного урана, выброшенные в процессе,

теперь приходят “бесплатно” (Табл.6). Отношение сырье-продукт составляет всего 3:1, что сравнимо со случаем объединения каскадов и является разумно низким а обоих случаях. Для разобранных случаев значения составляют 90 кг и 32 кг обогащенного до 3.5% урана на кг произведенного ВОУ, соответственно. Удивительно, но темпы производства даже выше в случае повторения программы, когда сравниваешь его с объединением каскадов.³⁹ Основываясь на выходных темпах двух относящихся к делу каскадов (P1-044 и P1-135), приведенных в Табл.3, 105-110 кг ВОУ производятся ежегодно на 1968 центрифугах, собранных в 9+3 каскадах. Обратите внимание также, что минимальное количество каскадов, необходимое для этого сценария повторения программы, составляет 656 машин (3 + 1 каскадов), которые производят 35-37 кг ВОУ в год, если предположить 100%-ную готовность.

Таблица 4: Количество сырья, требуемое для получения 1 кг урана оружейного качества при использовании объединения каскадов. Уровни обогащения продукта в субкаскадах взяты из ливийского проекта, как это приведено в документах южноафриканского суда. Потоки продукта рассчитаны таким образом, чтобы они соответствовали потоку сырья для следующего каскада, используя при этом только отведенную долю ЕРР на центрифугу. Соответственно, все каскады типа НС обдирают отходы до уровня естественного урана, который может вернуться в каскады С1/С2. Стратегия спасает 31 кг естественного урана и уменьшает полное требование до 280 кг естественного урана на кг произведенного урана оружейного качества.

	Сырье		Продукт		Отходы		ЕРР%	Машины%
	кг	%	кг	%	кг	%		
С1/С2	311.0 кг	0.72%	32.0 кг	3.50%	279.0 кг	0.40%	68.2	67.5
НС-01	32.0 кг	3.50%	4.6 кг	20%	27.4 кг	0.72%	22.6	22.5
НС-02	4.6 кг	20%	1.5 кг	60%	3.1 кг	0.72%	6.8	7.8
НС-03	1.5 кг	60%	1.0 кг	90%	0.5 кг	0.72%	2.4	2.2

Примечание: Относительное количество центрифуг приводится на основе приведенного количества машин (3936, 1312, 456 и 128).

Таблица 5; Итоги сценария прорыва, стартующего от естественного урана. Величины для нормализованных темпов производства учитывают 6000 центрифуг с полной разделительной возможностью около 15000 ЕРР/год. Повторение программы требует исключительно больших ресурсов по сравнению с объединением каскадов.

	Повторение программы	Объединение
Темпы производства (нормализованные)	38-40 кг в год (с 6000 машин)	91.0 кг в год (с 6000 машин)
Темпы производства (реальные)	35-37 кг в год (с 5576 машинами)	88.5 кг в год (с 5832 машинами)
Требования к ЕРР	387 ЕРР на кг ВОУ	165 ЕРР на кг ВОУ
Отношение сырье/продукт	33150 кг на кг	280 кг на кг

Подход объединения каскадов, который основан на трех каскадах типа НС от пакистанской конструкции с использованием всего 1896 центрифуг, производит 88.5 кг ВОУ в год, то есть, то же самое количество, что получалось от сырья с естественным ураном и полного набора каскадов.⁴⁰ Если каскады с 164 машинами были доступны поначалу, придется реформировать количество машин, эквивалентное 12 каскадам. В итоге с учетом сравнимых (и даже более высоких) темпов производства не является необходимым уделять особое внимание при прорыве заранее обогащенному топливу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом анализе был использован аналитический подход, впервые разработанный в 80-х годах, для оценки конструкций и рабочих характеристик ряда гипотетических центрифуг, представляющих важные поколения центрифуг, которые были разработаны и применялись в различных научно-исследовательских программах по всему миру. Используя простую численную модель, основанную на балансе массы урана, мы провели моделирование переход-

ной реакции как отдельных центрифуг, так и каскадов центрифуг. Результаты показывают, что типичные времена установления равновесия малы в сравнении с временем, которое требуется для получения значительных количеств обогащенного материала.

Таблица 6: Итоги сценария прорыва с использованием заранее обогащенного до 3.5% сырья. Величины для нормализованных темпов производства приведены для 2000 машин с полной разделительной возможностью около 5000 ЕРР/год. При выбранной стратегии эффективные темпы производства будут слегка выше для менее эффективного режима повторения программы, которому требуется гораздо большее количество заранее обогащенного НОУ (90 кг на каждый кг произведенного урана оружейного качества вместо 32 кг).

	Повторение программы	Объединение
Темпы производства (нормализованные)	107-113 кг в год (с 2000 машин)	93.4 кг в год (с 2000 машин)
Темпы производства (реальные)	105-110кг в год (с 1968 машинами)	86.5 кг в год (с 1896 машинами)
Требования к ЕРР	45 ЕРР на кг ВОУ	53.6 ЕРР на кг ВОУ
Отношение сырье/продукт	90 кг на кг	32 кг на кг

Важной целью анализа было определение правдоподобия и относительной важности различных сценариев прорыва и количественных темпов производства ВОУ для них. Среди рассмотренных вариантов были простое повторение программы для заранее обогащенного материала и объединение каскадов. Конструкция каскада, впервые разработанная в Пакистане для производства ВОУ на основе Р1-технологии, была использована, чтобы проиллюстрировать важность этих результатов.

Результаты говорят, что объединение каскадов особенно эффективно, если производство урана оружейного качества начинается с естественного урана, что является не самым вероятным допущением для сценария прорыва, но и отказом от специальной военной программы обогащения. В этом случае всего только около 280 кг сырья из естественного урана необходимо для получения одного кг ВОУ оружейного качества. Поскольку нет потерь материала и в идеале не происходит смешивания, стратегия фактически достигает теоретически максимальных темпов производства, основанных на стандартных формулах для разделительной мощности.

Впрочем, ситуация меняется, если имеется запас заранее обогащенного сырья. В этом случае повторение программы выглядит гораздо более привлекательным для прорыва, поскольку основная доля разделительной работы уже затрачена. Потеря большей части этого материала (в форме обогащенных отходов) может оказаться приемлемой, когда задачей является получение одного или нескольких значительных количеств настолько быстро, насколько возможно. Результаты, основанные на моделировании каскадов, предсказывают, что более 100 кг ВОУ оружейного качества можно произвести за год с обогащенным до 3.5% материалом и возможностью затратить 5000 ЕРР/год, что эквивалентно примерно 2000 центрифугам типа Р1. Если размер заранее обогащенного запаса сырья не ограничивает этот процесс, то от режима повторения программы не требуется быть менее эффективным, чем более сложный подход объединения каскадов. Кроме того, повторение программы не требует изменений конфигурации уже существующих каскадов, что еще больше ускорит прорыв, основанный на этом подходе. В общем, этот результат подчеркивает уместность заранее обогащенных запасов для прорыва и задачу сведения к минимуму запасов заранее обогащенного UF_6 , присутствующих в цикле гражданского ядерного топлива.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Уайтли обратил внимание, что проблема решения гидродинамических уравнений была обойдена во время Манхэттенского проекта выбором машины с внешним управлением. Смотрите S. Whitley, "Review of the Gas Centrifuge until 1962. Part 1: Principles of Separation Physics/ Part II: Principles of High-Speed Rotation," *Reviews of Modern Physics*, 56 (1984): 1, 41-97.

2. E. Rätz, *Analytische Lösungen für die Trennleistung von Gastentrifugen zur Uranenreicherung*, Ph.D. Thesis Technical University of Berlin, 1983). Следует отметить, что автор сравнивает основные результаты диссертации с 17 другими решениями, имевшимися в то время, и обращает внимание на сходства и отличия. Более короткая и не столь полная версия этого анализа была опубликована на английском языке: E.Rätz, *Analytical Solution for the Separative Power of Gas Centrifuges*, Fifth Workshop on Gases in Strong Rotation, University of Virginia (Charlottesville, 5-9 June, 1983). Другие решения по центрифугам, аналитические и численные, опубликованы в открытой литературе. Они дают сходные результаты. Важная особенность формализма Рэтца, кроме его простоты, заключается в возможности определения рабочих характеристик машин, работающих не в оптимальных условиях.
3. K.Cohen, *The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of U²³⁵* (New York McGraw-Hill, 1951), гл.6 и в особенности стр. 106-109. Вывод уравнения центрифуги воспроизведен также в работе: D.G.Avery and E.Davies, *Uranium Enrichment by Gas Centrifuge* (London, Mills & Boon Limited, 1973), Appendix II.
4. Смотрите ссылку [3], стр. 120.
5. Смотрите ссылку [2], гл. 8, стр. 8.8.
6. Противоток L определяется, как количество материала, текущее в одном слое профиля (вверх или вниз по течению) вдоль ротора центрифуги. Отсечка θ - это доля сырья, уходящего из центрифуги в виде продукта. Ректификатор Z_P - это длина ротора между точками ввода сырья и вывода продукта, в которой происходит обогащение материала. Соответственно, длина стриппера равна $(Z - Z_P)$.
7. Смотрите ссылку [2], гл. 8, стр. 8-17.
8. Смотрите ссылку [2], гл. 2, стр. 2.4-2.5.
9. Смотрите ссылку [3], стр. 110.
10. Для вывода смотрите, например, Avery and Davies, *Uranium Enrichment*, Appendix I или [2], разделы 3.2 и 8.1.
11. Смотрите [2], стр. 8.10.
- R. V. Kehoe, *The Enrichment Troika. A History of Urenco to the Year 2000* (Marlow, Buckinghamshire UK: Urenco Ltd, 2002), p.56. Сокращение иногда расшифровывается как *коммерческий ядерный ротор*.
12. M. Hibbs, "Current Capacity at Natanz Plant about 2500 SWU/yr, Data Suggest," *Nuclear Fuel* 30(3) (2006): 17.
13. M. Hibbs, "Report Suggests Pakistan Bought Components for Two Steel Centrifuges," *Nuclear Fuel* 30(14) (2005): 3.
14. В отчете об интервью президента Иранской организации по атомной энергии (12 апреля 2006 года) была ошибочно указана длина ротора (1.80 см). Диаметр ротора был пересчитан, исходя из приведенного числа оборотов в минуту (64 000) и периферической скорости.
15. Смотрите ссылку [12].
16. M. Hibbs, "Iraq Has Early Urenco Centrifuge Design, but Mass Production Years Away, Expert Says," *Nuclear Fuel* 15(26) (1990): 1.; M. Hibbs. "Customs Intelligence Data Suggest DPRK Aimed at G-2 Type Centrifuge," *Nuclear Fuel* 28(11) (2003): 3.
17. M. Hibbs. "Pakistan Developed More Powerful Centrifuges," *Nuclear Fuel* 32(3) (2007): 1; M. Hibbs, "P-4 Centrifuge Raises Intelligence Concerns about post-1975 Data Theft." *Nucleonics Week* 48(7) (2007): 1.
18. M. Hibbs, "Classified Dutch report suggested Khan saw key 4-m centrifuge data," *Nuclear Fuel* 30(2) (2005): 3.
19. M. Hibbs. "How Much Access?" *Nuclear fuel* 30(1) (2005): 1.
20. M. Hibbs. "Pakistan Development More Powerful Centrifuges." там же.
21. M. Hibbs. "P-4 Centrifuge Raised Intelligence Concerns about post-1975 Data Theft." Обозначения Urenco SLM и TC-10 даны в ссылке [12], стр. 113.
22. Pat Upson, "Centrifuge Technology: The Future for Enrichment," World Nuclear Association, Annual
23. Symposium (London, 5-7 September 2001). Те же самые или похожие графики использовались в других публикациях и брифингах Urenco.

24. Например, в документах, отобранных Службой энергетики Луизианы в 1991 году и цитированных в работе; R. Green, "Back to the Future," *Nuclear Engineering International* (September 2003), 36-39, www.neimagazine.com
25. Некоторые прототипы были изучены за этот период. Важными конструкциями считались т.н. Set III, которые имели разделительную возможность 200 ЕРР/год и были развернуты на обогатительном заводе с газовыми центрифугами в Портсмуте, в также Set IV и Set V, называемая также продвинутой газовой центрифугой (AGC). Целью разделительной производительности AGC было около 600 ЕРР/год. Смотрите [24].
26. Установка USEC сконструирована на 3.8 миллионов ЕРР/год с 11500 развернутыми машинами, что совпадает с наименьшей оценкой 330 ЕРР/год на машину. " В 2006 году проектная команда USEC в Окридже испытывала центрифугу, которая продемонстрировала производительность около 350 ЕРР/год на машину (что превосходит наш намеченный уровень производительности около 320 ЕРР./год на машину). Этот уровень был подтвержден в последующих испытаниях". *Fact Sheet American Centrifuge Uranium Enrichment Plant*, USEC Inc., (2008). www.usec.com, (доступ с 1 сентября 2008 года).
27. Типичные размеры Американской Центрифуги таковы: длина ротора - 40 футов (примерно 12 м), диаметр - около 2 футов (примерно 60 см); данные взяты, например, из статьи D. Charles, "U.S. Centrifuge Work Revived in Updated Form." *The Washington Post*, 23 April, 2007, p. A06.
28. Можно также предположить (и промоделировать), что темпы вывода прямо определяются темпом подачи сырья, которые будут поддерживать и фиксировать запасы UF_6 в машине все время.
29. Один торр определяется как 1/760 атмосферы и соответствует 1333.32 Па. В центрифуге давление на стенки менее 100 торр считается непрактичным, из-за риска десублимации газа UF_6 на стенках ротора.
30. D. R. Olander, "Переходные разделительные характеристики в газовой центрифуге," *Nuclear Technology*, 44, (1979), 307-314.
31. В обвинительном документе по южноафриканского суда по делу Даниеля Гейгера и Герхарда Виссера указаны конструкции ряда каскадов. Один из этих каскадов обогащает естественный уран до 3.5% и состоит из 968 (164x12) центрифуг. Указывается, что "завод явился продуктом оригинальных немецких чертежей и описаний, усовершенствованных в результате пакистанских испытаний, опыта и расчетов." ("Summary of Substantial Facts," *Charge Sheets, The State versus Daniel Geiger and Gerhard Wisser*, High Court of South Africa, Transvaal Provincial Division, 2006/ Paragraph 9.19).
32. Смотрите ссылку [15].
33. Однако неясно, принадлежат ли указанные темпы подачи сырья и выхода продукта гексафториду урана или чистому урану. Чтобы соответствовать ожидаемым разделительным характеристикам P-1, чистый уран более правдоподобен, так как указывает на более высокую производительность центрифуги, которая еще остается сравнительно низкой (около 1.32 ЕРР на машину). Несколько конструкций P-1, на которые имеются ссылки и которые оптимизированы на различные темпы подачи сырья, исследуются в этой статье. В любом случае, заявления о количестве ступеней (всего 15, из них 10 в обогатительной степени) и центрифуг (всего 164, из них 24 ступенях подачи сырья) рассматриваются как главные ограничения на определение образа типичного каскада в дальнейшем.
34. Для обсуждения идеальных каскадов смотрите, например работы Cohen. *The Theory of Isotope Separation* (ссылка [3a], гл.1) или Avery and Davis, *Uranium Enrichment* (ссылка [3b], раздел 5.2).
35. Другие идеальные, но несимметричные каскады возможны и рассматривались для применения в качестве каскадов для разделения. Смотрите, например, D. R. Olander, "Two-up, One-down Ideal Cascades for Isotope Separation," *Nuclear Technology*, 29, (1976), 108-112.
36. Другие названия для объединения каскадов - последовательные каскады и параллельное перекрытие.
37. Например, США указали на некоторые детали своего комплекса производства ВОУ, где операции заводов по газовой диффузии в Падуке, Окридже и Портсмуте было объединено аналогичным образом. Смотрите Рис. 2.2 (стр. 27) в работе *Highly Enriched Uranium: Striking Balance; Historical Report on the United States Highly Enriched Uranium Production, Acquisition and Utilization Activities from 1945 through September 30, 1996*. Rev.1, Draft, U.S. Department of

Energy, January 2001 (publicly released in 2006), www.ipfmlibrary.org/doe01.pdf (accessed September 1, 2008)

38. Обратите внимание, что число центрифуг в каскаде НС-01 кратно 164 ($8 \times 164 = 1312$).

39. Даже требования к ЕРР на кг полученного ВОУ ниже для режима повторения программы. Это не означает, конечно, что повторение программы оказывается более эффективным процессом. Для полной оценки эффективности надо принимать во внимание величину заранее обогащенного запаса сырья. Но, как указывалось, величину этого запаса можно исключить, потому что он уже имеется и не влияет на временной ход этого сценария.

40. Здесь считается, что каскад НС-типа продолжает обеднять уран до 0.72%, хотя НС-02 и НС-03 можно переконструировать так, чтобы они вели обеднение только до 3.5%, чтобы повторно ввести свои отходы в каскад НС-01. Такая альтернативная стратегия сделает производственный процесс более эффективным.