

РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ОБОГАЩЕННЫХ УРАНОВЫХ ПРОДУКТОВ МНОГОПОТОЧНЫХ КАСКАДОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Е.В. Семёнов, В.В. Харитонов

НИЯУ МИФИ

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

Р

На современных предприятиях по разделению изотопов урана в качестве питания разделительного каскада может одновременно использоваться несколько сырьевых материалов: природный уран, регенерированный уран, полученный в результате переработки ОЯТ, или обедненный (отвальный) уран (все в форме гексафторида урана). На выходе разделительного каскада могут одновременно получать несколько видов обогащенного уранового продукта с разной степенью обогащения. В статье предлагается отсутствующая в литературе методика расчета себестоимости каждого обогащенного уранового продукта в многопоточных разделительных каскадах. В предлагаемой методике используются стандартные определения изотопной ценности продуктовых и питательных потоков и разделительного потенциала Пайерлса-Дирака. В качестве примеров эффективности методики приведены численные расчеты себестоимости обогащенной урановой продукции для трех производственных задач: вовлечения обедненного гексафторида урана (ОГФУ) в производство обогащенного уранового продукта; одновременного производства двух обогащенных продуктов; использования ОГФУ для снижения стоимости более высокообогащенного продукта из двух (применительно, например, к перспективному толерантному топливу). Показано, что добавки ОГФУ в качестве питания многопродуктового разделительного каскада позволяют снизить себестоимость продукта с более высокой степенью обогащения; при сложившихся рыночных ценах на природный уран и работу разделения существует диапазон глубины отвала разделительного каскада, в котором выгоднее обогащать ОГФУ, а не природный уран.

Ключевые слова: себестоимость обогащенных урановых продуктов, многопоточное обогатительное производство, работа разделения, эффективность вовлечения ОГФУ в обогатительный процесс.

ВВЕДЕНИЕ

На современных предприятиях по разделению изотопов урана в качестве питания разделительного каскада может одновременно использоваться несколько сырьевых материалов: не только природный уран, но и регенерированный уран, полученный в результате переработки ОЯТ, или обедненный (отвальный) уран (все в форме гексафторида урана). На выходе разделительного каскада могут одновременно получать несколько видов обогащенного уранового продукта с разной степенью обогащения. Если

© *Е.В. Семёнов, В.В. Харитонов, 2022*

денежная стоимость сырьевых материалов, как правило, известна (по рыночным данным или контрактным условиям), то для определения стоимости каждого из обогащенных продуктов методик расчета в доступной литературе найти не удалось. Ряд публикаций посвящен решению актуальной задачи оптимизации многопоточных каскадов для очистки регенерированного урана от изотопов ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U , которые накапливаются в процессе многократной рециркуляции регенерата урана при использовании, например, РЕМИКС-топлива [1 – 5]. Вопросы экономической эффективности вовлечения обедненного гексафторида урана (ОГФУ) в обогатительное производство и использования регенератов урана и плутония в производстве РЕМИКС-топлива рассмотрены в работах [6 – 8]. Однако в этих работах рассматривается обогащение ОГФУ или регенерата урана с производством единственного продукта – эквивалента натурального урана или обогащенного уранового продукта соответственно.

Поэтому цель работы – предложить методику расчета стоимости каждого обогащенного уранового продукта в многопоточных разделительных каскадах.

ЭКОНОМИКА ОДНОПРОДУКТОВОГО КАСКАДА

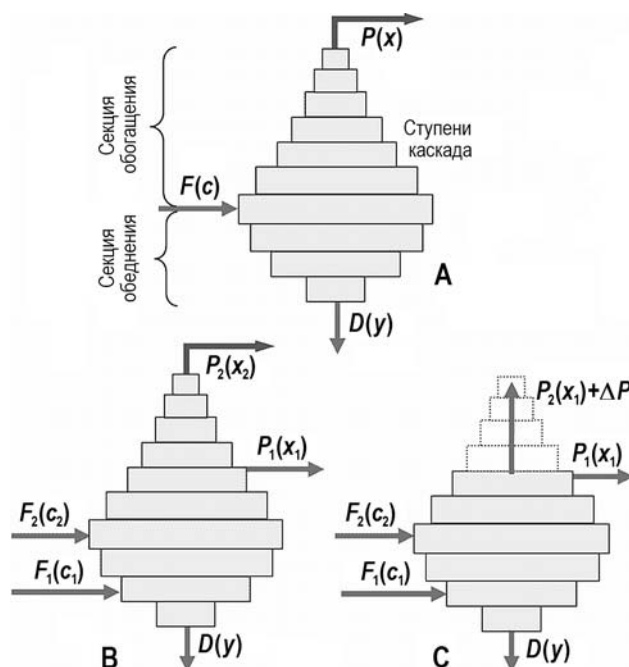


Рис. 1. Схемы разделительных каскадов: А – традиционный каскад с одним потоком питания $F(c)$ из природного урана и одним потоком обогащенного уранового продукта $P(x)$ при потоке отвала $D(y)$; В – каскад с двумя сырьевыми потоками и двумя потоками обогащенного урана; С – часть каскада В с теми же двумя сырьевыми потоками, что и на рис. В, но с одним продуктовым (промежуточным) потоком $P_{x1}=P_1(x_1)+P_2(x_1)+\Delta P$ на выходе ступени с обогащением x_1 .

На рисунке 1А показана стандартная схема обогащения природного урана массой $F(c)$ с единственным продуктом массой $P(x)$ и обогащением x при массе отвала $D(y)$ и глубине отвала y (концентрация ^{235}U в отвальном уране). Суммарные затраты Z , определяющие цену (себестоимость) $C_x = Z/P$ обогащенного продукта, включают в себя оплату исходного сырья по цене C_F , работу разделения R по цене C_R и утилизацию отвального урана по цене C_D согласно хорошо известной формуле [6, 9 – 12]

$$Z = FC_F + RC_R + DC_D, \quad (1)$$

включающей в себя вышеперечисленные три вида затрат. Отметим, что себестоимость работы разделения, как показано в работе [13], зависит от мощности завода в силу

масштабного фактора. Однако для целей настоящей работы все цены, входящие в формулу (1), рассматриваются как заданные.

Общепринятое определение работы разделения выражается как разность между изотопной ценностью продуктов (обогащенного урана и отвала) и сырья (природного урана) в виде [9 – 12]

$$R = P(x)V(x) + D(y)V(y) - F(c)V(c), \quad (2)$$

где $V(z) = (1 - 2z)\ln[(1 - z)/z]$ разделительный потенциал Пайерлса-Дирака ($z = x, y$ или c).

Изотопной ценностью называют произведение массы потока на его разделительный потенциал (например, ценность обогащенного продукта есть $P(x)V(x)$). Из баланса масс вытекает взаимосвязь между потоками F, P и D в виде коэффициентов расхода природного урана на единицу продукта (F/P) и образования отвалов на единицу продукта (D/P):

$$F/P = (x - y)/(c - y); \quad D/P = F/P - 1 = (x - c)/(c - y). \quad (3)$$

Подстановка (3) в (2) дает классическое определение удельной работы разделения (называемой также нормой работы разделения):

$$R/P = V(x) + V(y)(x - c)/(c - y) - V(c)(x - y)/(c - y). \quad (4)$$

Подстановка выражений (2) – (4) в формулу (1) дает традиционное определение затрат Z на обогащение природного урана и себестоимость обогащенного уранового продукта C_x , \$/кг:

$$C_x = Z/P = C_F(x - y)/(c - y) + C_R[V(x) + V(y)(x - c)/(c - y) - V(c)(x - y)/(c - y)] + C_D(x - c)/(c - y). \quad (5)$$

Единственным параметром, с помощью которого можно управлять себестоимостью продукта при заданном обогащении продукта x и определенных ценах на сырье (природный уран с концентрацией $c = 0,711\%$), работу разделения и утилизацию отвала, является глубина отвала y (концентрация ^{235}U в отвальном уране). Как показано в [12], оптимальная глубина отвала, при которой достигается минимум себестоимости обогащенного урана, зависит только от отношения цен $(C_F + C_D)/C_R$ и не зависит от обогащения продукта. По данным за 2020 г. среднегодовые спотовые котировки на природную окись-закись урана составили 75 \$/кгU, на услуги по конверсии 21 \$/кгU (т.е. $C_F = 96$ \$/кгU), на работу разделения $C_R = 49$ долл./кгU [14]. Полагая $C_D = 7$ \$/кгU, получаем $(C_F + C_D)/C_R = 2,1$ и оптимальную глубину отвала $y_0 = 0,154\%$, которой соответствует минимальная себестоимость обогащенного до $x = 4,95\%$ уранового продукта $C_x = 1359$ \$/кгU. В этой величине затраты на природный уран (в форме гексафторида) составляют 61%, на работу разделения 35% и на утилизацию отвала 4%.

ЭКОНОМИКА МНОГОПРОДУКТОВОГО КАСКАДА

На рисунке 1В показана схема многопродуктового обогащения при нескольких потоках питания каскада и отбора продукции. Для наглядности и упрощения записей рассмотрено два потока питания $F_1(c_1), F_2(c_2)$ и два отбора обогащенной продукции $P_1(x_1), P_2(x_2)$, причем концентрации ^{235}U в потоках питания удовлетворяют условиям $y < c_1 < c_2 \leq c = 0,711\%$, а обогащение продуктов условиям $c < x_1 < x_2$. Приведенные ниже выражения можно легко обобщить на любое число потоков питания и отбора.

Обобщая подход [10] к анализу обогащения наборов сырья, можно показать, что для произвольного числа сырьевых и продуктовых потоков расчет работы разделения и суммарной стоимости продукции сводится к «однопродуктовой» модели *А с той лишь разницей*, что вместо концентраций x и c , разделительных потенциалов $V(x)$ и $V(c)$, а также цен на сырье C_F используются средневзвешенные значения соответственно для продуктовых и сырьевых потоков:

$$\langle x \rangle = (x_1 P_1 + x_2 P_2) / P; \quad \langle c \rangle = (c_1 F_1 + c_2 F_2) / F; \quad P = P_1 + P_2; \quad F = F_1 + F_2; \quad (6)$$

$$\langle V(x) \rangle = [V(x_1) P_1 + V(x_2) P_2] / P; \quad \langle V(c) \rangle = [V(c_1) F_1 + V(c_2) F_2] / F. \quad (7)$$

$$\langle C_F \rangle = [F_1 C_{F1} + F_2 C_{F2}] / F = f C_{F1} + (1 - f) C_{F2}. \quad (8)$$

Здесь P и F – суммарные массы потоков обогащенных продуктов и потоков питания соответственно; $f = F_1 / F$ – доля питания каскада с меньшей концентрацией ^{235}U . Выражения (6), (7) однозначно вытекают из классического определения работы разделения с учетом изотопной ценности всех потоков питания и отбора, имеющего для схемы В следующий вид:

$$R_B = P_1 V(x_1) + P_2 V(x_2) + D(y) V(y) - F_1 V(c_1) - F_2 V(c_2). \quad (9)$$

В итоге для многопродуктового каскада получаем аналоги выражений (4), (5) для удельной работы разделения и удельных затрат в виде

$$R_B / P = \langle V(x) \rangle + \langle V(y) \rangle (\langle x \rangle - \langle c \rangle) / (\langle c \rangle - y) - \langle V(c) \rangle (\langle x \rangle - y) / (\langle c \rangle - y) \equiv V_B; \quad (10)$$

$$Z_B / P = \langle C_F \rangle (\langle x \rangle - y) / (\langle c \rangle - y) + C_R V_B + C_D (\langle x \rangle - \langle c \rangle) / (\langle c \rangle - y). \quad (11)$$

Величина V_B в выражении (10) есть удельная работа разделения или норма работы разделения многопродуктового разделительного каскада. Из выражений (10), (11) следует, что при заданных параметрах питания и отборов продуктов существует оптимальная глубина отвала y_0 , при которой затраты на производство обогащенных продуктов минимальны, причем, как и в предыдущем случае (схема А), величина y_0 зависит только от отношения цен. В частности, если питание каскада состоит из одинаковых по массе потоков природного урана ($c_2 = c = 0,711\%$) и обедненного гексафторида урана (ОГФУ) с нулевой стоимостью ($C_{F1} = 0$), то для вышеприведенных рыночных цен получим ($C_{F2} \equiv C_F$, $F_2 / F = F_1 / F = 1/2$)

$$\langle C_F \rangle = C_F / 2; \quad (\langle C_F \rangle + C_D) / C_R = 1,12 \quad \text{и} \quad y_0 = 0,216\%.$$

Выражение (11) при заданной массе обогащенных продуктов P определяет суммарные затраты разделительного производства на закупку двух видов сырья для питания каскада (первое слагаемое в правой части) и на работу разделения при двух отборах обогащенного уранового продукта (второе слагаемое) с учетом затрат на утилизацию отвала (последнее слагаемое). Затраты на каждый вид сырья в формуле (11) определены, а затраты на работу разделения изотопов для каждого обогащенного продукта, как и вклад стоимости сырья в себестоимость каждого обогащенного продукта, не определены, что не позволяет оценить себестоимость каждого обогащенного продукта. Для решения этой задачи воспользуемся схемой С.

Распределение затрат на производство обогащенных продуктов и оценка их себестоимости. Согласно теории разделительных каскадов [9, 11], работа разделения каскада вычисляется как сумма работ разделения на каждой ступени каскада. Поэтому оценим сначала работу разделения до отбора первого продукта с меньшим обогащением $x_1 < x_2$ (см. рис. 1С). Разделительный каскад на рисунке – это часть каскада, изображенного на рис. 1В. На выходе ступени отбора продукта с обогащением x_1 масса обогащаемого потока превышает массу готовых продуктов $P = P_1 + P_2$ на некоторую величину ΔP в соответствии с динамикой обогащаемой массы в обогатительной секции разделительного каскада (с учетом обратного потока обедненной массы):

$$F / (P + \Delta P) = (x_1 - y) / (\langle c \rangle - y) \quad \text{или} \quad \Delta P / P = \beta_2 (x_2 - x_1) / (x_1 - y). \quad (12)$$

В последнем выражении введено обозначение $\beta_2 = P_2 / P$ – массовая доля более высокообогащенного продукта в продуктивном портфеле разделительного каскада и учтено, что согласно (10)

$$F / P = (\langle x \rangle - y) / (\langle c \rangle - y) \quad \text{и} \quad \langle x \rangle - x_1 = \beta_2 (x_2 - x_1).$$

Как следует из (12), $\Delta P = 0$ при $x_1 = x_2$ и $\beta_2 = 0$. Если $\beta_2 = 1$, то одновременно $x_1 = x_2$. Работу разделения для схемы С получаем по аналогии со стандартным выводом формул (4) или (10) в виде

$$R_C/(P + \Delta P) = V(x_1) + V(y)(x_1 - \langle c \rangle)/(\langle c \rangle - y) - \langle V(c) \rangle(x_1 - y)/(\langle c \rangle - y) \equiv V_C \quad (13)$$

где R_C – работа разделения до ступени первого отбора обогащенного урана в схеме С; V_C – удельная работа разделения (или норма работы разделения) в схеме С.

Разность $\Delta R = R_B - R_C$ между работой разделения (10) для схемы В и работой разделения (13) для схемы С дает величину работы разделения на увеличение обогащения массы урана $P_2 + \Delta P$ от x_1 до x_2 для получения второго продукта массой P_2 . Остается распределить между каждым товарным продуктом (отборами) работу разделения R_C а также затраты на сырье в схеме В, определяемые первым слагаемым в формуле (11), и затраты на утилизацию отвала, определяемые последним слагаемым в формуле (11). Сумму затрат на сырье и утилизацию отвала обозначим так:

$$Z_{BFD} = P[\langle C_F \rangle(\langle x \rangle - y)/(\langle c \rangle - y) + C_D(\langle x \rangle - \langle c \rangle)/(\langle c \rangle - y)]. \quad (14)$$

В рамках рассматриваемого традиционного подхода к расчету работы разделения представляется логичным величины Z_{BDF} и R_C распределить пропорционально массовой доле каждого обогащенного продукта. В итоге определяются суммарные затраты на каждый обогащенный продукт:

$$Z_1 = \beta_1(Z_{BDF} + R_C C_R); \quad Z_2 = \beta_2(Z_{BDF} + R_C C_R) + \Delta R C_R \quad (15)$$

где $\beta_1 = P_1/P$ и $\beta_2 = 1 - \beta_1 = P_2/P$ – относительные массовые доли отборов обогащенных продуктов. Выражение (15) удовлетворяет условию $Z_1 + Z_2 = Z_B$. В итоге определяется себестоимость каждого обогащенного продукта

$$C_{x1} = Z_1/P_1 = (Z_{BDF} + R_C C_R)/P = \langle C_F \rangle(\langle x \rangle - y)/(\langle c \rangle - y) + C_D(\langle x \rangle - \langle c \rangle)/(\langle c \rangle - y) + V_C C_R(\langle x \rangle - y)/(x_1 - y); \quad (16)$$

$$C_{x2} = Z_2/P_2 = C_{x1} + C_R \Delta R/P_2. \quad (17)$$

Из (17) видно, что себестоимость продукта с большим обогащением превышает себестоимость продукта с меньшим обогащением на величину

$$C_R \Delta R/P_2 = C_R [P V_B - V_C (P + \Delta P)]/P_2 = C_R [V(x_2) - V(x_1)(x_2 - y)/(x_1 - y) + V(y)(x_2 - x_1)/(x_1 - y)]. \quad (18)$$

Отсюда следует, что $\Delta R = 0$ при $x_1 = x_2$. Таким образом, определена себестоимость каждого обогащенного продукта. Полученные результаты могут применяться для решения ряда производственных задач. Ниже приведены в качестве примеров численные расчеты себестоимости обогащенных продуктов для трех таких задач: вовлечения обедненного гексафторида урана (ОГФУ) в производство обогащенного уранового продукта; одновременного производства двух обогащенных продуктов; вовлечения ОГФУ для снижения стоимости более высокообогащенного продукта из двух (применительно к перспективному толерантному топливу).

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ОБОГАЩЕННОГО УРАНОВОГО ПРОДУКТА ПРИ ПИТАНИИ КАСКАДА ПРИРОДНЫМ УРАНОМ И ОГФУ

К настоящему времени в мире накоплено около 2 млн. т (Мт) обедненного гексафторида урана с концентрацией ^{235}U в диапазоне 0,1 – 0,4% по массе в расчете на металлический уран [6, 15, 16]. Различная концентрация ^{235}U в ОГФУ обусловлена технологическими условиями и экономическими соображениями, связанными с загрузкой обогатительного производства и соотношением цен на работу разделения изотопов урана и на природный уран. Подробно схемы вовлечения ОГФУ в производство обогащенного уранового продукта или эквивалента натурального урана

рассмотрены в работе [6]. Здесь мы оценим только зависимость стоимости обогащенного уранового продукта C_x ($x_2 \equiv x = 4,95\%$) от доли ОГФУ в питании каскада ($f = F_1/F$) и концентрации ^{235}U в питающем ОГФУ (c_1) и в отвальном уране каскада (y). Доля питающего ОГФУ (от внешнего заказчика) может изменяться от $f = 0$ (схема А) до $f = 1$. В последнем случае, когда питание каскада состоит только из ОГФУ, стоимость обогащенного урана определяется выражением (5) при замене c на c_1 и C_F на C_{F1} .

Концентрация ^{235}U в ОГФУ меньше, чем в природном уране, поэтому для получения на выходе заданного количества обогащенного урана требуется затратить больше работы разделения, чем в случае обогащения только природного урана. Но стоимость ОГФУ (C_{F1}) может быть существенно ниже стоимости природного урана (C_{F2}), так что можно надеяться на положительный экономический эффект.

Как следует из рис. 2, где приведены результаты прямого расчета себестоимости ОУП, полученного при обогащении ОГФУ и природного урана, существует диапазон глубины отвала разделительного каскада, в котором выгоднее обогащать ОГФУ, а не природный уран, при сложившихся рыночных ценах на природный уран и работу разделения ($C_{F2}/C_R > 1$). Чем выше цена природного урана по сравнению с ценой единицы работы разделения (чем больше отношение C_{F2}/C_R), тем выгоднее обогащать ОГФУ. На себестоимость ОУП существенно влияет входная цена ОГФУ (0 – 10 \$/кгU).

В предельном случае нулевой цены ОГФУ (штриховая линия) выгоднее обогащать ОГФУ, а не природный уран практически во всем диапазоне глубин отвала (до 0,3% при концентрации ОГФУ 0,3%) (рис. 2а). Повышение цены ОГФУ до 10 \$/кг U существенно увеличивает стоимость ОУП, снижает прибыль (в расчете на 1 кг ОУП) и сокращает диапазон глубины производственного отвала для рентабельного обогащения ОГФУ. При концентрации ^{235}U в ОГФУ ниже 0,3% диапазон прибыльности использования ОГФУ существенно сокращается (рис. 2б).

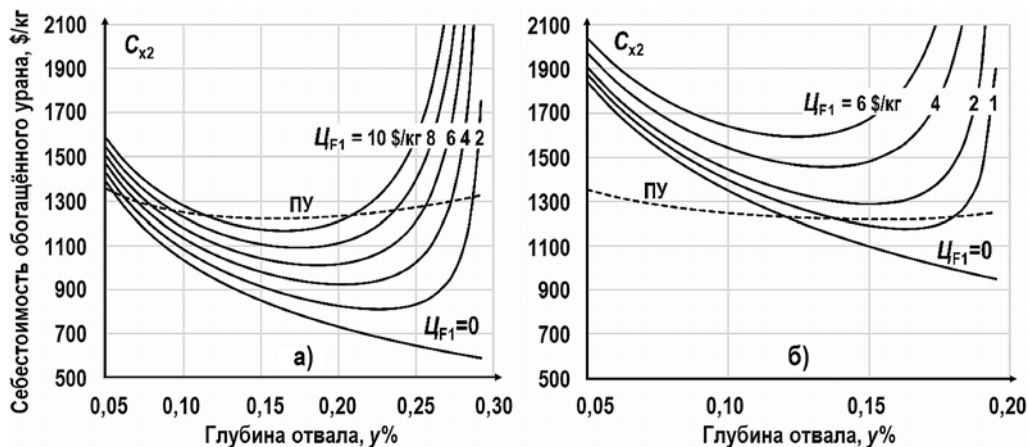


Рис. 2. Себестоимость обогащенного до 4,95% уранового продукта, получаемого из ОГФУ с концентрацией $y_1 = 0,3\%$ (а) и $0,2\%$ (б), в зависимости от глубины вторичного отвала (y) и стоимости ОГФУ ($C_D = 0 - 10$ \$/кгU) при рыночных котировках на природный гексафторид урана $C_F = 90$ \$/кг U и на работу разделения $C_R = 45$ \$/EPP. Штриховая линия ПУ – себестоимость ОУП из природного урана

При заданной установленной мощности разделительного каскада масса образующегося ОУП (в расчете на единицу работы разделения, P/R) увеличивается с ростом концентрации ^{235}U в отвале (рис. 3), причем питание каскада в форме ОГФУ почти вдвое снижает выход продукции в расчете на единицу работы разделения по сравнению с питанием каскада природным ураном.

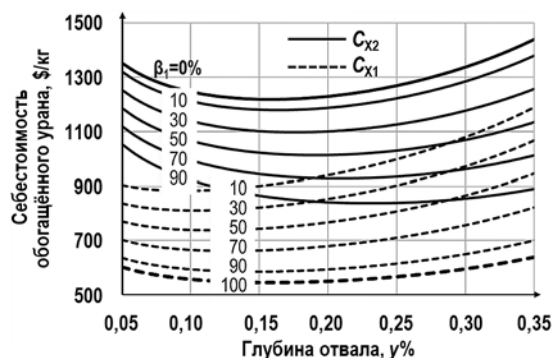


Рис. 3. Отношение P/R массы обогащенного продукта к затратам работы разделения (в кгU/EPP) при обогащении до $x = 4,95\%$ природного урана ($f = 0$) или обедненного гексафторида урана (ОГФУ, $f = 1$) при содержании урана-235 в ОГФУ 0,3% и 0,2% в зависимости от глубины отвала раздельного каскада ($\gamma = 0,08 - 0,31\%$)

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ДВУХ ОБОГАЩЕННЫХ УРАНОВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ПИТАНИИ КАСКАДА ПРИРОДНЫМ УРАНОМ

Оценим зависимость стоимости каждого из продуктов с обогащениями $x_1 = 2,5\%$ и $x_2 = 4,95\%$ (например, для реакторов РБМК и ВВЭР) от массовой доли $\beta_1 = P_1/P$ слабообогащенного продукта и глубины отвала $\gamma = 0,05 - 0,35\%$. Доля слабообогащенного продукта может изменяться от $\beta_1 = 0$ (схема А, производится только ОУП с обогащением $x_2 = 4,95\%$) до $\beta_1 = 1$ (схема А, производится только ОУП с обогащением $x_1 = 2,5\%$). В последнем случае, когда продукт каскада состоит только из слабообогащенного урана ($x_1 = 2,5\%$), его стоимость определяется выражением (5) при замене x на x_1 . Как следует из рис. 4, цены продуктов каскада с двумя отборами располагаются между двумя границами: верхняя граница соответствует стоимости монопродукта с большим обогащением x_2 , а нижняя граница – стоимости монопродукта с меньшим обогащением x_1 , т.е. двухпродуктовое производство удешевляет более дорогой продукт и, наоборот, удорожает более дешевый продукт.

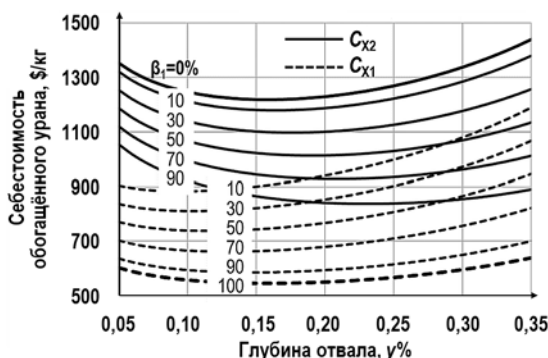


Рис. 4. Зависимость себестоимости обогащенных урановых продуктов при $x_1 = 2,5\%$ и $x_2 = 4,95\%$ от массовой доли низкообогащенного продукта ($\beta_1 = 0 - 100\%$) и глубины отвала двухпродуктового раздельного каскада ($\gamma = 0,05 - 0,35\%$) при питании природным ураном

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО ПРОДУКТА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОГФУ В ПИТАНИИ КАСКАДА

Можно проверить, насколько удастся снизить стоимость высокообогащенного продукта (например, при $x_2 = 7\%$ как для перспективного толерантного топлива с топливным циклом 24 мес. [17 – 20]), если в качестве питания использовать ОГФУ наряду с природным ураном. Дело в том, что за счет снижения средневзвешенного обогащения потоков питания возрастают работа разделения и соответствующие затраты, но поскольку

ку ОГФУ может иметь нулевую стоимость, то в итоге можно получить выигрыш в суммарных затратах и снизить стоимость продукции. Рассмотрим вариант одновременного производства в разделительном каскаде двух продуктов с обогащениями $x_2 = 7\%$ (для толерантного топлива) и $x_1 = 4,95\%$ (для традиционного топлива) в зависимости от доли высокообогащенного продукта $\beta_2 = P_2/P$ и от доли ОГФУ в питании каскада $f = F_1/F$. Результаты расчета себестоимости обоих продуктов представлены в табл. 1 и на рис. 5.

Таблица 1

Себестоимость обогащенных урановых продуктов двухпродуктового разделительного каскада при $x_1 = 4,95\%$ и $x_2 = 7\%$ в зависимости от доли высокообогащенного продукта ($\beta_2 = P_2/P = 0 - 1$) и доли ОГФУ с концентрацией $c_1 = 0,3\%$ в питании каскада ($f = 0 - 1$). Исходные цены: $C_{F1} = C_D = 0$; $C_{F2} = 90 \text{ \$/кгU}$; $C_R = 45 \text{ \$/ЕРР}$. Глубина отвала $y = 0,15\%$

Себестоимость, $\text{\$/кгU}$	Питание природным ураном $f = 0, (c) = 0,711\%$				Питание ОГФУ $f = 1, (c) = 0,3\%$			
	$\beta_2=0$	$\beta_2=0,2$	$\beta_2=0,8$	$\beta_2=1$	$\beta_2=0$	$\beta_2=0,2$	$\beta_2=0,8$	$\beta_2=1$
$C_{x1} (x_1=4,95\%)$	1219	1323	1635	–	850	923	1141	–
$C_{x2} (x_2=7\%)$	–	1377	1689	1793	–	978	1195	1267

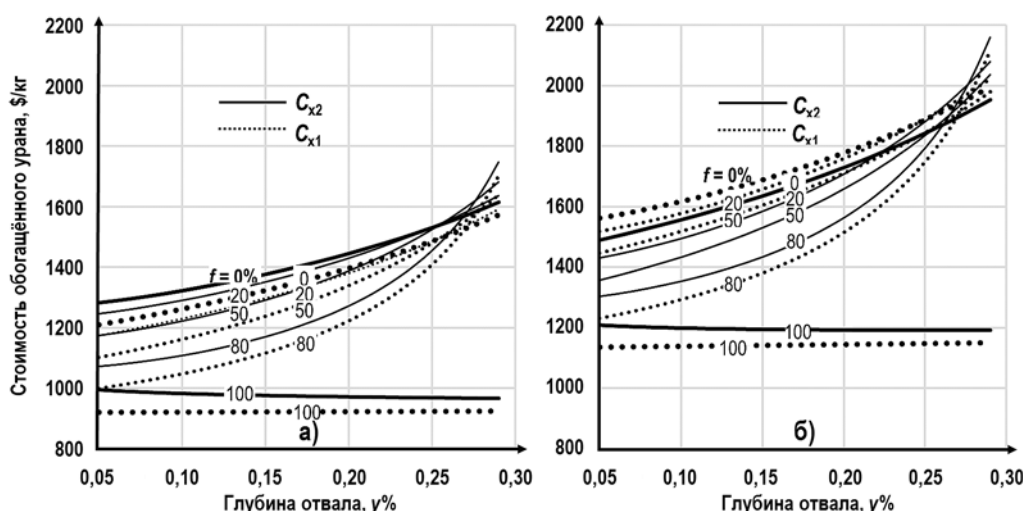


Рис. 5. Себестоимость обогащенных урановых продуктов двухпродуктового разделительного каскада при $x_1 = 4,95\%$ и $x_2 = 7\%$ в зависимости от доли ОГФУ с концентрацией $c_1 = 0,3\%$ в питании каскада ($f = 0 - 1$) и доли высокообогащенного продукта ($\beta_2 = P_2/P$), равной 0,2 (а) и 0,8 (б), при глубине отвала $y = 0,15\%$. Линии с большей толщиной соответствуют предельным значениям $f = 0$ и $f = 100\%$. Исходные цены: $C_{F1} = C_D = 0$; $C_{F2} = 90 \text{ \$/кгU}$; $C_R = 45 \text{ \$/ЕРР}$

Как следует из таблицы, себестоимость обогащенного уранового продукта в одноподуктовом каскаде при питании только природным ураном ($f = 0$) составляет $1219 \text{ \$/кгU}$ ($x_1 = 4,95\%$) и $1793 \text{ \$/кгU}$ ($x_2 = 7\%$) при одинаковой глубине отвала $y = 0,15\%$. Себестоимость тех же продуктов при питании одноподуктового каскада только ОГФУ ($f = 1$) с концентрацией изотопа ^{235}U $c_1 = 0,3\%$ и нулевой стоимостью сокращается соответственно до 850 и $1267 \text{ \$/кгU}$ (примерно в 1,42 раза). Одновременное производство продуктов с разным обогащением в двухпродуктовом разделительном каскаде при питании только обедненным ураном ведет к снижению цены более высокообогащенного продукта с 1267 до $978 \text{ \$/кгU}$ и повышению цены менее обогащенного продукта с 850 до $923 \text{ \$/кгU}$. При этом цена продукта с обогащением $4,95\%$ остается заметно ниже $1219 \text{ \$/кгU}$, соответствующей питанию каскада только природным ураном. Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительного сокраще-

ния себестоимости обогащенных урановых продуктов в многопродуктовом разделительном каскаде при использовании обедненного гексафторида урана в качестве питания каскада.

Представленные на рис. 5 результаты расчетов показывают, что при заданном достаточном высоком обогащении продуктов и при питании каскада только ОГФУ ($f = 100\%$) с нулевой стоимостью величина себестоимости обоих продуктов практически не зависит от глубины отвала разделительного каскада (нижние кривые). Снижение доли ОГФУ в питании каскада сопровождается повышением влияния глубины отвала на себестоимость обоих продуктов.

С уменьшением доли ОГФУ в питании каскада себестоимость обоих продуктов повышается и тем сильнее, чем больше глубина отвала. Повышение доли более высокообогащенного продукта до 80% приводит к росту себестоимости обоих продуктов (рис. 5б). Изменение состава (долей) продуктов и состава (долей) питания разделительного каскада сопровождается существенным изменением выхода продуктов (в расчете на единицу работы разделения) и потребностью в питании (в расчете на единицу продукции), как показано в табл. 2.

Таблица 2

Влияние доли ОГФУ f в питании двухпродуктового разделительного каскада и доли β_2 высокообогащенного продукта ($x_2 = 7\%$) на суммарный выход обогащенных урановых продуктов (P , тонн) в расчете на 1 млн. единиц работы разделения (R , млн. ЕРР) и на потребность в питании F в расчете на единицу продукции P при $x_1 = 4,95\%$ и глубине отвала $y = 0,15\%$

f	$\beta_2 = 0$		$\beta_2 = 0,2$		$\beta_2 = 0,8$		$\beta_2 = 1$	
	P/R , т/млн. ЕРР	F/P	P/R , т/млн. ЕРР	F/P	P/R , т/млн. ЕРР	F/P	P/R , т/млн. ЕРР	F/P
0,0	100	7,6	90	8,3	70	10,5	65	11,2
0,2	95	9,0	86	9,9	66	12,5	62	13,3
0,5	84	12,5	76	13,6	59	17,1	55	18,3
0,8	69	19,7	62	21,4	49	26,7	45	28,5
1,0	53	31,0	48	33,7	38	41,9	35	44,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведена новая методика расчета распределения затрат на каждый обогащенный продукт и, соответственно, себестоимости каждого продукта многопоточного разделительного каскада. В методике используется стандартное определение работы разделения и разделительного потенциала Пайерлса-Дирака.

На основании предложенной методики приведены результаты численных расчетов себестоимости обогащенной урановой продукции для трех производственных задач: вовлечения обедненного гексафторида урана (ОГФУ) в производство высокообогащенного уранового продукта; одновременного производства двух обогащенных продуктов; использования ОГФУ для снижения стоимости более высокообогащенного продукта из двух (применительно к перспективному толерантному топливу).

Показано, что двухпродуктовое производство (по сравнению с однопродуктовым) удешевляет более дорогой продукт и, наоборот, удорожает более дешевый продукт. Добавки ОГФУ в качестве питания многопродуктового разделительного каскада позволяют снизить себестоимость продукта с более высокой степенью обогащения и несколько увеличить себестоимость продукта с меньшей степенью обогащения. Показано также, что при сложившихся рыночных ценах на природный уран

(в форме гексафторида урана) и работу разделения существует диапазон глубины отвала разделительного каскада, в котором выгоднее обогащать ОГФУ, а не природный уран.

Благодарность

Авторы признательны М.В. Поздееву, А.И. Израилевичу и В.А. Палкину, дискуссии с которыми стимулировали подготовку настоящей работы.

Литература

1. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ природным сырьем и отвальным ураном // Атомная энергия. – 2014. – Т. 117. – Вып. 1. – С. 36-41.
2. Палкин В.А., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Каскад газовых центрифуг для концентрирования ^{235}U в дополнительном отборе и очистки регенерированного гексафторида урана от $^{232,234,236}\text{U}$. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 2. – С. 83-88. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4270/4848> (дата доступа 10.02.2022).
3. Палкин В.А., Маслюков Е.В. Очистка регенерированного гексафторида урана от $^{232,234,236}\text{U}$ в промежуточном отборе каскада с двумя питаниями. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126 – Вып. 2. – С. 98-102. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2532/2833> (дата доступа 10.02.2022).
4. Ковалев Н.В., Зильберман Б.Я., Голецкий Н.Д., Синюхин А.Б. Новый подход к повторному использованию отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов в рамках концепции РЕМИКС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 1. – С. 67-77. DOI: <https://doi.org/10.26583/jpre.2020.1.07>.
5. Декусар В.М., Каграманян В.С., Калашников А.Г. и др. Анализ характеристик РЕМИКС-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 109-117. DOI: <https://doi.org/10.26583/jpre.2013.4.14>.
6. Павлов Ю.Г., Ульянин Ю.А., Лазарев Д.А., Харитонов В.В. Эффективность вовлечения обеднённого урана в обогатительное производство. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – Вып. 1. – С. 29-35. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2585/2886> (дата доступа 10.02.2022).
7. Ульянин Ю.А., Харитонов В.В. Экономика сбалансированного ядерного топливного цикла с инновационным РЕМИКС-топливом. // Микроэкономика. – 2021. – № 2. – С. 55-63. DOI: <https://doi.org/10.33917/mic-2.97.2021.55-63>.
8. Матвеевко А.В., Харитонов В.В., Павлов Ю.Г., Ульянин Ю.А. Оценка конкурентоспособности регенерированного уран-плутониевого РЕМИКС-топлива в тепловых реакторах. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 1. – С. 52-56. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4265/4561> (дата доступа 10.02.2022).
9. Синёв М.Н. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
10. Гордеев Б.К. Введение в экономику ядерного топливного цикла атомной энергетики. – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2001. – 128 с.
11. Борисевич В.Д., Борман В.Д., Сулаберидзе Г.А. Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге. / Под ред. В.Д. Бормана: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2005. – 320 с.
12. Харитонов В.В. Динамика развития ядерной энергетики. Экономико-аналитические модели. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 328 с.
13. Rothwell G. Market power in uranium enrichment. // Science & Global Security. – 2009. – No. 17. – PP. 132-154. DOI: <https://doi.org/10.1080/08929880903423586>.
14. Годовой отчет АО «Атомэнергпром» за 2020 г. – 147 с. Электронный ресурс: <http://>

/atomenergoprom.ru/ru/invest/annual (дата доступа 10.02.2022).

15. *Diehl Peter*. Re-Enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia. // WISE Uranium Project, 2004. – 47 p. Электронный ресурс: <https://www.laka.org/docu/boeken/pdf/6-01-2-25-12.pdf#page=2> (дата доступа 10.02.2022).

16. *Bannink Dirk*. URENCO 19702020: From the Treaty of ALMELO to Atom Ausstieg. // WISE, 2020. Электронный ресурс: <https://wiseinternational.org/labels/enrichment> (дата доступа 10.02.2022).

17. *Семенов Е.В., Харитонов В.В.* Микроэкономика повышения безопасности АЭС на основе толерантного топлива. // Микроэкономика. – 2021. – № 5. – С.49-62. DOI: <https://doi.org/10.33917/mic-5.100.2021.49-61>.

18. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. – NEA-OECD, 2018. – 372 p.

19. *Карпюк Л.А., Лысинов А.В., Маслов А.А. и др.* Перспективное металлическое уран-молибденовое топливо, устойчивое к авариям. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 3. – С. 148-152. Электронный ресурс: <https://www.j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4278/4856> (дата доступа 10.02.2022).

20. *Карпюк Л.А., Новиков В.В., Кулаков Г.В. и др.* Сплав 42ХНМ и карбид кремния как материал оболочек твэлов, устойчивых к авариям. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 4. – С. 211-215.

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

Авторы

Семенов Евгений Вадимович, аспирант
E-mail: evsmv@bk.ru

Харитонов Владимир Витальевич, профессор, д.ф.-м.н.
E-mail: VVKharitonov@mephi.ru

UDC 621.039.31

CALCULATION OF ENRICHED URANIUM PRODUCTS COSTS IN MULTI-THREADED CASCADES OF ENRICHMENT PROCESS

Semenov E.V., Kharitonov V.V.

MEPhI

31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

At modern uranium enrichment facilities there are several raw materials can be used simultaneously as a feed: natural uranium, regenerated uranium obtained as a result of SNF reprocessing, or depleted uranium (all in the form of uranium hexafluoride). At the output of the separation cascade, several types of enriched uranium product with different level of enrichment can be simultaneously produced. The article suggests a method of calculating the cost of each enriched uranium product in multi-threaded separation cascades that is missing in the literature. The methodology suggests use of standard definitions of the isotopic value of feed and product and the separation potential proposed by Peierls and Dirac. Numerical calculations of the cost of enriched uranium products for three production tasks are given as examples of the effectiveness of the methodology: 1) the involvement of depleted uranium hexafluoride in the production of an enriched uranium product; 2) the simultaneous production of two enriched products; 3) the use of depleted uranium to reduce the cost of a more highly

enriched product of the two (in relation to a promising tolerant fuel). It is shown that partial use of depleted uranium as a feed for a multi-product separation cascade can reduce the cost of a product with a higher level of enrichment; with the prevailing market prices for natural uranium and SWU, there is a big range of tail assay levels, in which it is more profitable to enrich depleted uranium, rather than natural uranium.

Key words: enriched uranium products cost, multi-threaded enrichment production, separative work unit, effectiveness of involvement of depleted uranium in production process.

REFERENCES

1. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Enrichment of Regenerated Uranium with Simultaneous Dilution of $^{232-236}\text{U}$ by Raw and Waste Uranium. *Atomic Energy*, 2014, v. 117, no.1, pp. 44-51; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9886-0>.
2. Palkin V.A., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Gas Centrifuge Cascade for Concentrating ^{235}U in Additional Product and Purification of Processed Uranium Hexafluoride from $^{232,234,236}\text{U}$. *Atomic Energy*, 2021, v.130, no.2, pp. 88-93; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00779-8>.
3. Palkin V.A., Maslyukov E.V. Purification of Regenerated Uranium Hexafluoride by Removal of $^{232,234,236}\text{U}$ in the Intermediate Product of a Two-Feed-Flow Cascade. *Atomic Energy*, 2019, v. 126, no. 2, pp. 110-115; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00523-3>.
4. Kovalev N.V., Zilberman B.Ya., Goretsky N.D., Sinyukhin A.B. A New Approach to the Reuse of Spent Nuclear Fuel of Thermal Reactors within the REMIX Concept. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2020, no. 1, pp. 67-77; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.1.07> (in Russian).
5. Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Kalashnikov A.G., Kapranova E.N., Korobitsyn V.E., Puzakov A.Yu. Analysis of the Characteristics of REMIX Fuel During Multiple Recycling in VVER Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2013, no. 4, pp. 109-117; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2013.4.14> (in Russian).
6. Pavlov Yu.G., Ulyanin Yu.A., Lazarev D.A., Kharitonov V.V. Economic Efficiency of Bringing Depleted Uranium into Enrichment. *Atomic Energy*. 2019, v. 127, no.1, pp. 33-39; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00580-8>.
7. Ulyanin Yu.A., Kharitonov V.V. Economics of a Balanced Nuclear Fuel Cycle with Innovative REMIX Fuel. *Mikroekonomika*, 2021, no. 2, pp. 55-63 (in Russian).
8. Matvienko A.V., Kharitonov V.V., Pavlov Yu.G., Ulyanin Yu.A. Competitiveness Assessment of Regenerated Uranium-Plutonium Remix Fuel in Thermal Reactors. *Atomic Energy*, 2021, v. 130, no. 1, pp. 57-62; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00774-z>.
9. Sinev M.N. *Economics of Nuclear Energy: Fundamentals of Technology and Economics of Nuclear Fuel Production. Economics of Nuclear Power Plants: Textbook for Universities*. 3-rd ed. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987, 480 p. (in Russian).
10. Gordeev B.K. *Introduction to the Economics of the Nuclear Fuel Cycle of Nuclear Energy*. Moscow. TsNIIATOMINFORM Publ., 2001, 128 p. (in Russian).
11. Borisevich V.D., Borman V.D., Sulaberidze G.A. *Physical Bases of Isotope Separation in a Gas Centrifuge*. Edited by V.D. Borman: Textbook. Moscow. MEFPh Publ., 2005, 320 p. (in Russian).
12. Kharitonov V.V. *Dynamics of Nuclear Energy Development. Economic and Analytical Models*. Moscow. MEFPh Publ., 2014, 328 p. (in Russian).
13. Rothwell G. Market power in uranium enrichment. *Science & Global Security*, 2009, no. 17, pp. 132-154; DOI: <https://doi.org/10.1080/08929880903423586>.
14. *Results of the Activities of Atomenergoprom JSC for 2020*. Annual Report. 147 p. Available at: <http://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual> (accessed Feb. 10, 2022) (in Russian).

15. Diehl Peter. Re-Enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia. WISE Uranium Project, 2004, 47 p. Available at: <https://www.laka.org/docu/boeken/pdf/6-01-2-25-12.pdf#page=2> (accessed Feb. 10, 2022).

16. Bannink Dirk. URENCO 19702020: From the treaty of ALMELO to atom ausstieg. WISE, 2020. Available at: <https://wiseinternational.org/labels/enrichment> (accessed Feb. 10, 2022).

17. Semenov E.V., Kharitonov V.V. Microeconomics of Improving the Safety of Nuclear Power Plants Based on Tolerant Fuel. *Mikroekonomika*, 2021, no. 5, pp. 49-62 (in Russian).

18. State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels. NEA-OECD, 2018. 372 p.

19. Karpyuk L.A., Lysikov A.V., Maslov A.A., Mikheev E.N., Novikov V.V., Orlov V.K., Titov A.O. Prospective Accident-Tolerant Uranium-Molybdenum Metal Fuel. *Atomic Energy*. 2021, v. 130, no. 3. pp. 156-160; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00787-8>.

20. Karpyuk L.A., Novikov V.V., Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Leontieva-Smirnova M.V., Golubnichy A.A., Ivanov S.I., Makarov F.V., Glebov A.V. 42KhNM Alloy and Silicon Carbide as Material for Accident-Tolerant Fuel-Rod Cladding. *Atomic Energy*. 2021, v. 130, no. 4, pp. 224-228; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00799-4>.

Authors

Semyonov Evgeniy Vadimovich, PhD Student

E-mail: evsmv@bk.ru

Kharitonov Vladimir Vitalievich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: VKharitonov@mephi.ru