

ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛОКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ФОР – ИНЖЕКТОРА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО СЕПАРАТОРА ЭЛЕМЕНТОВ

Ю.В. Ковтун, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина*

Фор-инжектор металлической плазмы для резонансного сепаратора элементов по определению должен выполнять двойную функцию: превращение разделяемого вещества из твердого состояния в парообразное, ионизацию парообразного вещества и нагрев образованной плазмы до необходимых температур. Данная работа посвящена оценкам тепловых характеристик блока фазовых превращений фор-инжектора металлической плазмы, в частности, энергозатрат, массового расхода рабочего вещества, удельной скорости испарения для группы металлов, представляющих интерес для сепарационных экспериментов при условии сохранения непрерывности потока разделяемого вещества как в нейтральном, так и ионизированном состоянии по длине фор-инжектора, включая область блока фазовых превращений и область ионизатора.

Фор-инжектор металлической плазмы для резонансного сепаратора элементов по определению должен выполнять двойную функцию: превращение разделяемого вещества из твердого состояния в парообразное; ионизацию парообразного вещества и нагрев образованной плазмы до необходимых температур. Т.е. он должен состоять по крайней мере из двух частей: испарителя и ионизатора–термализатора (по сути дела, из плазменного источника, рабочим веществом в котором служит разделяемое вещество).

В [1] была высказана и обоснована идея создания плазменного источника для ионно-атомных сепарационных устройств и технологий на основе пучково-плазменного разряда, приведена и обсуждена блок-схема такого источника. Она включает следующие составные части:

- блок фазовых превращений, в котором исходное разделяемое вещество, как правило тяжелые металлы, переходит из твердого в парообразное состояние;

- дозатор, регулирующий массовый расход разделяемого вещества для поддержания постоянства потоков нейтрального вещества и металлической плазмы, соответственно;

- камеру ионизации, где происходит ионизация разделяемого вещества в паровой фазе и образование металлической плазмы требуемых параметров с помощью механизма пучково-плазменного взаимодействия;

- электронную пушку для получения электронного пучка, производящего ионизацию разделяемого вещества в паровой фазе за счет ударной ионизации на линейной стадии и коллективных процессов на стадии нелинейного (экспоненциального) роста плотности плазмы.

Важной характеристикой плазменного источника в целом и отдельных его частей является его энергетика, т.е. затраты энергии на реализацию фазовых превращений разделяемого вещества и его ионизацию. Для определения его эффективности произведем оценку энергетических затрат, требуемого массового расхода рабочего вещества при постоян-

ном плазменном потоке, а также удельной скорости испарения материала в блоке фазовых превращений для групп металлов, представляющих интерес как для проведения имитационно-сепарационных экспериментов, так и для промышленной или полупромышленной переработки радиоактивных отходов (РАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ).

Ожидаемые размеры демонстрационного сепарирующего устройства могут быть следующими [1]: радиус плазмы $\sim 0,5$ м, длина плазменного столба ~ 4 м, плотность ионной компоненты плазмы $\geq 10^{12}$ см $^{-3}$, плазменный поток $4,7 \cdot 10^{21}$ част./с. Дальнейшие расчеты и оценки будут проводиться с учетом этих размеров и величин.

В блоке фазовых превращений методом физического воздействия (плавление, испарение, корпускулярное распыление) происходит переход рабочего вещества из исходного состояния в парообразное – пригодное для ионизации. Поддержание плазменного потока на уровне $4,7 \cdot 10^{21}$ част./с, при условии 100% ионизации, будет определять скорость испарения вещества. При нагревании вещества в высоком вакууме его масса, испаряющаяся с единицы поверхности за единицу времени, определяется уравнением Ленгмюра [2]:

$$a_V = \alpha \cdot 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot P_S \cdot \sqrt{\frac{M_D}{T_V}}, \quad (1)$$

где a_V – удельная скорость испарения, г/см 2 с; α – коэффициент испарения (для идеального случая $\alpha=1$); T_V – температура вещества, К; P_S – упругость пара при температуре T_V , Па; M_D – массовое число испаряемого вещества.

Уравнение (1) справедливо в предположении, что ни одна из испаряющихся частиц не возвращается на испаряемую поверхность сквозь газ или облако пара над испарителем. При невыполнении этого условия скорость испарения меньше, чем рассчитываемая по (1), и определяется как $a_{V1} = k \cdot a_V$, где k – коэффициент возврата, который в зависимости от скорости a_V и давления газа может принимать значения от 0 до 1. Уже при давлении газа 1 Па его

влияние на скорость испарения a_{vl} становится существенным. Согласно [3] коэффициент возврата k при испарении меди в среде аргона с остаточным давлением 10^{-2} , 10^{-1} , 133 Па равняется соответственно 1, 0,92, 0,68.

Для оценки скорости испарения, а также энергии, затрачиваемой на переход твердое тело-пар, были выбраны следующие элементы и их соединения: из конструкционных материалов Al, Cu; тугоплавких металлов с высокими значениями температуры плавления и давления упругости пара Ti, Zr, Mo, W; легкоплавких с относительно низкими величинами температуры плавления и давления упру-

гости пара In, Bi, Cd, Pb, Sn, а также уран и диоксид урана, физические свойства которых приведены в табл. 1 [4-8]. На рис. 1 показаны результаты расчета удельной скорости испарения вышеперечисленных металлов и соединений от температуры (см. табл.1). Расчет производился по формуле (1) при коэффициенте испарения $\alpha=1$, зависимость упругости пара от температуры бралась из [9]. Следует отметить, что для UO_2 данные об упругости пара выше температуры 2800 К отсутствуют. Экспериментальные данные по скорости испарения Ti при резистивном нагреве представлены в [10].

Таблица 1

Элемент	A (M) [4]	ρ , г/см ³ [4]	$C_{p, 298}^0$, Дж/моль К	$T_{пер}$, К	$\Delta L_{пер}$, кДж/моль	$T_{пл}$, К	$\Delta L_{пл}$, кДж/моль	$T_{исп}$, К [5]	$\Delta L_{исп}$, кДж/моль [5]
Al	26,98	2,699	24,35	–	–	933,61	10,7	2793	291,4
Cu	63,55	8,96	24,44	–	–	1357,77	13,14	2833	304,8
Ti	47,88	4,505	25,06	1156 $\alpha \rightarrow \beta$	3,8	1944	14,6	3558	469,3
Zr	91,22	6,45	22,54	1140 $\alpha \rightarrow \beta$	3,87	2133	13,7	4673	579,9
Mo	95,94	10,22	23,932	–	–	2896	40	4883	590,3
W	183,85	19,32	24,27	–	–	3695	46	5828	737
In	114,82	7,31	26,9	–	–	429,78	3,283	2343	232,4
Bi	208,98	9,8	26,0[4]	–	–	544[9]	10,89[9]	1837	179,2
Cd	112,41	8,65	26,02[4]	–	–	593,9[9]	6,41[9]	1040	99,6
Pb	207,2	11,336	26,65	–	–	600,65	4,812	2023	178,8
Sn	118,71	7,29	27,11	297[4] $\alpha \rightarrow \beta$	–	505,118	7,195	2898	296,4
U	238,03	19,04	27,665	942 $\alpha \rightarrow \beta$ 1049 $\beta \rightarrow \gamma$	2,78 4,73	1408	8,72	4673	417,5
UO_2	(270,03)	10,95	63,6	–	–	3123	78	3723[4]	

A (M) – атомный (молекулярный) вес вещества;
 ρ – плотность вещества;
 $C_{p, 298}^0$ – молярная теплоемкость при температуре 298 К;
 $T_{пер}$ – температура фазового перехода в твердом состоянии, связанного с изменением кристаллической решетки;

$\Delta L_{пер}$ – скрытая теплота перехода в твердом состоянии;
 $T_{пл}$ – температура плавления;
 $\Delta L_{пл}$ – скрытая теплота плавления;
 $T_{исп}$ – температура испарения;
 $\Delta L_{исп}$ – скрытая теплота испарения.

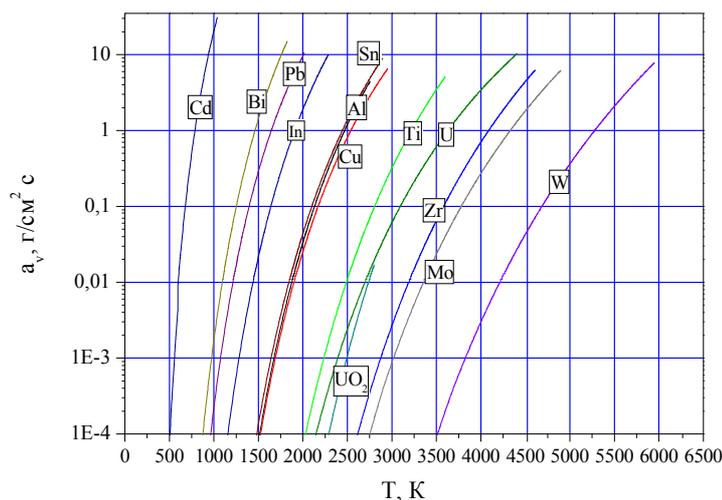


Рис.1. Удельная скорость испарения металлов от температуры

Массовый расход \dot{m} рабочего вещества для поддержания постоянства плазменного потока зависит от атомного (молекулярного) веса вещества и увеличивается с увеличением массы, что потребует для тяжелых металлов по сравнению с легкими увеличения удельной скорости испарения или площади испарения. Увеличение удельной скорости испарения требует увеличения температуры расплава, которая ведет к повышению давления насыщенного пара, а значит к интенсификации взаимодействия пар-пар с образованием капельной фазы. В этом случае капли жидкого металла могут попадать вместе с паром из блока фазовых превращений в камеру ионизации, что нежелательно, конденсироваться на стенках как камеры ионизации, так и блока фазовых превращений, а также возвращаться в жидкий расплав. Это ведет к значительному влиянию коэффициента возврата k на удельную скорость испарения, уменьшая ее соответственно. Хотелось бы отметить тот факт, что увеличение длины транспортного тракта пара в камеру ионизации может привести в некоторых случаях за счет взаимодействий пар-газ и пар-пар к минимальному количеству подаваемого вещества. В этом случае решающую роль будет играть не скорость испарения, а длина тракта. Исходя из этого будет выбираться удельная скорость испарения вещества, площадь испарения с учетом коэффициента возврата k . Для рассматриваемых металлов при неизменном плазменном потоке на уровне $4,7 \cdot 10^{21}$ част./с значения требуемого массового расхода вещества \dot{m} , удельной скорости испарения a_v , температуры T_v , площади испарения S приведены в табл. 2. При чем температура T_v выбиралась при достижении упругости насыщенного пара на уровне 133 Па.

Таблица 2

Элемент	\dot{m} , г/с	a_v , г/см ² ·с	T_v , К	S , см ²
Al	0,213	$7,14 \cdot 10^{-3}$	1843	59,6
Cu	0,501	$1,1 \cdot 10^{-2}$	1612	91
Ti	0,377	$8,24 \cdot 10^{-3}$	2464	91,5

Zr	0,719	$1 \cdot 10^{-2}$	3189	143,8
Mo	0,756	$1 \cdot 10^{-2}$	3362	151,2
W	1,448	$1,2 \cdot 10^{-2}$	4250	241,4
In	0,905	$1,6 \cdot 10^{-2}$	1478	113,12
Bi	1,646	$2,5 \cdot 10^{-2}$	1153	131,68
Cd	0,886	$2,5 \cdot 10^{-2}$	627	70,88
Pb	1,632	$1,8 \cdot 10^{-2}$	1254	181,4
Sn	0,935	$1,5 \cdot 10^{-2}$	1881	124,66
U	1,875	$1,7 \cdot 10^{-2}$	2781	220,6
UO ₂	2,127	$1,7 \cdot 10^{-2}$	2800	250,24

Оценка общих (полных) энергозатрат на превращение твердого вещества в пар требует учета энергопотерь вследствие излучения, теплопроводности, конвекции. В общем виде уравнение теплового баланса можно записать следующим образом:

$$E_{T-II} = Q_{T-II} + Q_{mn} + Q_{изл.} + Q_{к}, \quad (2)$$

где Q_{T-II} – количество теплоты для испарения тела; Q_{mn} – потери энергии на теплопроводность; $Q_{изл.}$ – потери энергии на излучение; $Q_{к}$ – потери энергии на конвекцию.

Для реального вещества, которое меняет свое агрегатное состояние из твердого в парообразное, а также может испытывать полиморфные превращения в твердом состоянии, количество теплоты для испарения тела должно включать всю теплоту превращения, а также учитывать изменяющиеся уравнения теплоемкости, зависящие от строения или состояния вещества. Количество теплоты Q_{T-II} для испарения вещества, имеющего одно фазовое превращение в твердом состоянии ($\alpha \rightarrow \beta$), в общем виде можно представить следующим выражением:

$$Q_{T-II} = \int_{298}^{T_{прев.}} C_P^{(\alpha)} dT + L_{\alpha \rightarrow \beta} + \int_{T_{прев.}}^{T_{плав.}} C_P^{(\beta)} dT + L_{плав.} + \int_{T_{плав.}}^{T_{исп.}} C_P^{(ж)} dT + L_{исп.} \quad (3)$$

где $L_{\alpha \rightarrow \beta}$, $L_{плав.}$, $L_{исп.}$ – скрытая теплота переходов (превращений), Дж/моль; $C_P^{(\alpha)}$, $C_P^{(\beta)}$, $C_P^{(ж)}$ – теплоемкости, зависимость которых от температуры меняется при переходе вещества из одного состояния в другое, Дж/моль К.

В табл.3 показаны расчетные значения молярного количества теплоты для испарения

выбранных металлов, а также удельное количество теплоты, для UO_2 (молярная и удельная теплота плавления). Значения теплопроводности от температуры и скрытых теплот переходов брались из [5-8].

Таблица 3

Элемент	$Q_{т-п}$ $\cdot 10^{-5}$, Дж/моль	Q $\cdot 10^{-3}$, Дж/г
Al	3,8	13,96
Cu	3,96	6,19
Ti	6,16	12,78
Zr	7,63	8,31
Mo	7,98	8,26
W	9,93	5,37
In	2,92	2,53
Bi	2,3	1,09
Cd	1,28	1,13
Pb	2,33	1,12
Sn	3,79	3,17
U	6,46	2,7
UO_2	3,78	1,39

Потери энергии на излучение можно записать в следующем виде:

$$Q_{изл.} = t \cdot \int_{S_{изл.}} \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 dS, \quad (4)$$

где ε – коэффициент черноты, изменяющийся от 0 до 1; σ – постоянная Стефана-Больцмана $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁴; T – температура тела, К; $S_{изл.}$ – площадь излучения, м².

Поверхностная мощность излучения при температуре плавления приведена в работе [11] для Al, Cu, Sn, Mo, W и составляет соответственно 5; 7,2; 18; 340; 940 Вт/см², для Pb, Ti, Zr по данным [12] 25; 60; 248 Вт/см². Оценка показывает, что для площади испарения, приведенной в табл.2, при температуре плавления потери энергии излучением для Al, Cu, Sn, Mo, W, Pb, Ti, Zr составят 298; 655,2; 2243,88; $51 \cdot 10^3$; $226 \cdot 10^3$; 4535; 5490; $35,6 \cdot 10^3$ Дж.

Потери энергии на теплопроводность будут зависеть от конструктивных особенностей источников испарения, которые, в свою очередь, зависят от способа нагревания материала (электронным лучом, индукционным способом, резистивным нагревом, лазером). Также будут зависеть от материала и способа охлаждения тигля, для теплоизолированных тиглей, когда эффективная поверхность, через которую проходит поток теплопроводности, имеет такой же порядок величин, что и поверхность испарения,

потери тепла теплопроводностью будут минимальные. Тепловые потери тигля зависят от условий теплопередачи на поверхности, разделяющей испаряемый материал и тигель. Характер теплопередачи через эту поверхность зависит от того, находится ли испаряемый материал в расплавленном состоянии, и если находится, то в каком количестве. Кроме того, на этой поверхности могут образовываться пленки окислов, влияющие на теплопередачу. Особенно велики тепловые потери в тигле, когда в жидком состоянии находится весь материал, а удельная теплопроводность испаряемого материала очень велика, как, например, у алюминия или меди. Потери энергии на теплопроводность можно записать в следующем виде:

$$Q_{тп.} = t \cdot \int_{S_{тп.}} \lambda \frac{dT}{dL} dS, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $S_{тп.}$ – поверхность, через которую проходит поток тепла за счет теплопроводности, м².

В жидких расплавах передача тепла от наиболее нагретой области через расплав к стенке тигля происходит не только теплопроводностью, но и конвекцией. Высокие градиенты температуры в небольших тиглях вызывают сильное движение металла в ванне, при этом доля потерь тепла конвекцией возрастает.

В ряде случаев сепарационных технологий особый интерес может представлять механизм катодного распыления тугоплавких металлов в плазме газового разряда. Для определения его эффективности проведем оценки энергозатрат при распылении следующей группы металлов: Zr, Mo, W, U. Учтем, что на начальной стадии используются для поджига разряда газы – аргон, криптон, ксенон, затем возможно поддержание разряда за счет самораспыления. Коэффициент распыления ионами ксенона этих металлов [13] составляет 1,02; 1,03; 1,06; 2,02 для энергии 1000 эВ. В таких разрядах энергия ионов составляет ~ 2/3 от приложенного напряжения, затраты на ионизацию - ~ 200 эВ на ион-электронную пару. Молярные энергозатраты на распыление составят для Zr – $1,6 \cdot 10^8$ Дж/моль, Mo – $1,58 \cdot 10^8$ Дж/моль, W – $1,55 \cdot 10^8$ Дж/моль, U – $8,16 \cdot 10^7$ Дж/моль.

В заключение приведем величины удельных энергозатрат, определенных экспериментально [14-16] с учетом реально существующих потерь, для одного из возможных вариантов способа испарения, а именно, электронно-лучевого испарения, для случая высокой мощности электронного пучка (табл.4).

Таблица 4

Материал	P_0 , кВт	a_v , г/с	E_m , Дж/г	
Zr	72	0,325	$2,2 \cdot 10^5$	Плоско лучевая пушка 150 кВт
Нержавеющая сталь, 20% Cr	70	1,181	$5,94 \cdot 10^4$	Водоохлаждаемый тигель диаметром 100 мм
Алюминиевая бронза	80	1,125	$1,044 \cdot 10^5$	–

Al	250	12,778	1,944·10 ⁴	Аксиальная пушка 250 кВт, керамический тигель 500 500мм
----	-----	--------	-----------------------	---

Проведенный анализ и оценка энергетических затрат требуемого массового расхода рабочего вещества, удельной скорости испарения материала, необходимых для поддержания постоянства плазменного потока для сепарационных устройств и технологий, дают основания для следующих выводов.

1. Количественно определены условия сохранения непрерывности потока разделяемого вещества по длине фор-инжектора, включая область блока фазовых превращений и область ионизатора. Для обеспечения постоянства плазменного потока равного $4,7 \cdot 10^{21}$ част./с необходимо поддерживать плотность нейтральных частиц примерно на порядок выше, чем плотность ионизованных частиц в силу различия скоростей ионизованных и нагретых частиц плазмы и нейтральных частиц, движущихся с тепловыми скоростями.

2. Требуемое количество теплоты для испарения выбранных элементов будет увеличиваться с ростом температуры испарения данных веществ и составлять около 10^5 Дж/моль. Исключением является диоксид урана, молярная теплоемкость (при температуре 298 К) которого в 2,3...2,9 выше, чем у остальных элементов, что приводит к повышенным энергозатратам около 10^6 Дж/моль.

3. Значение энергопотерь теплопроводностью зависит, с одной стороны, от коэффициента теплопроводности при данной температуре, с другой, - от конструкционных особенностей источников испарения, что позволяет уменьшать их путем плавки вещества в теплоизолированных тиглях, а также плавление не всего материала в тигле, а только поверхностного слоя, что осуществимо при дуговой, электронно-лучевой или лазерной плавке.

4. Высокие температуры расплава ведут не только к существенному увеличению потерь за счет теплопроводности, но и за счет излучения, а в некоторых случаях и конвекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов, Ю.В. Ковтун // *ОТ-ТОМ-8*. Харьков, 2007.
2. J.Langmuir // *Phys. Rev.* 1913, v. 2, №5, p.329-342.

3. В. Wenzel // *Forschungsinstitut M. von Ardenne*. Dresden, 1974, personl. Mitt.
4. В.А. Рабинович, В.Я.Хавин // *Краткий химический справочник*. М.: «Химия», 1991, 432 с.
5. К.Дж.Смитлз // *Металлы*. М.: «Металлургия», 1980, 447с.
6. Л.В.Гурвич, И.В.Вейц, В.А.Медведев и др. // *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. М.: «Наука», 1979, т. II, кн.1, 440 с.
7. Л.В.Гурвич, И.В.Вейц, В.А.Медведев и др. // *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. М.: «Наука», 1981, т. III, кн.1, 472 с.
8. Л.В.Гурвич, И.В.Вейц, В.А.Медведев и др. // *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. М.: «Наука», 1982, т. IV, кн.1, 623 с.
9. А.И.Ефимов и др. // *Свойства неорганических соединений*: Справочник. М.: «Химия», 1983, 392 с.
10. В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко, Н.Н.Пилипенко // *Сборник докладов 7-го Международного симпозиума "Чистые металлы"*, Украина, Харьков, 2001, с.64.
11. S.Dushman // *Scientific foundations of vacuum technique, 2. Aufl.* New York, J. Wiley a. Sons, Inc., 1962.
12. *Evaporation and containment of evaporant*: Firmenprospect, Airco-Temescal, 1972/73.
13. N.Matsunami, Y.Yamamura, Y.Itikawa, N.Itoh, Y.Kazumata, S.Miyagawa, K.Morita, R.Shimizu and H.Tawara // *Energy dependence of the yields of ion-induced sputtering of monatomic solids*. Institute of plasma physics Nagoya university, Nagoya, Japan, 1983, p. 284.
14. S.A.O. Schiller // *In. R.M. Silva. Electron beam processing seminar Stratford-upon-Avon, England, 1974*. Dayton, Ohic. Universal Technol. Corp. 1974, p. 2d 1-2d 28.
15. Ch.d'A. Hughes, J.L. Hunt // *In. R.M. Silva Electron beam processing seminar Stratford-upon-Avon, England, 1974*. Dayton, Ohic. Universal Technol. Corp. 1974, p. 4a 1-4a 18.
16. A.Anderson // *Physical vapor deposition-present and future*. Automobile engineering meet. Detroit, Michigan, 1973.

ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛОКА ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ФОР-ІНЖЕКТОРА МЕТАЛЕВОЇ ПЛАЗМИ ДЛЯ РЕЗОНАНСНОГО СЕПАРАТОРА ЕЛЕМЕНТІВ

Ю.В. Ковтун, Є.І. Скібенко, В.Б. Юферов

Фор-інжектор металевої плазми для резонансного сепаратора елементів по визначенню повинен виконувати двояку функцію: перетворення розподіляємої речовини з твердого стану в пароподібний, іонізацію пароподібної речовини та нагрівання утвореної плазми до необхідних температур. Ця робота присвячується попереднім розрахункам та оцінкам теплових характеристик блока фазових перетворень фор-інжектора металевої плазми, в тому числі енерговитрат, масового розходу робочої речовини, питомої швидкості випарування для групи металів, які є цікавими для проведення сепарационних експериментів при умові збереження неперервності потоку розподіляємої речовини як в нейтральному, так і в іонізованому стані на всій довжині фор-інжектора, включаючи простір блоку фазових перетворень та простір іонізатора.

THERMAL CHARACTERISTICS OF THE BLOCK OF PHASE TRANSFORMATIONS FOR-INJECTOR METALLIC PLASMAS FOR THE RESONANT SEPARATOR OF ELEMENTS

Yu.V. Kovtun, E.I. Skibenko, V.B. Yuferov

For-injector metal plasma for a resonant separator of elements by definition should carry out double function: transformation of divided substance from a firm condition in vaporous, ionization of vaporous substance and heating of the educated plasma to necessary temperatures. The given work is devoted to estimations of thermal characteristics of the block of phase transformations for-injector metal plasma, in particular, power inputs, the mass charge of working substance, specific speed of evaporation for group of the metals, representing interest for eparations experiments under condition of preservation of a continuity of a stream of divided substance as in neutral, and the ionized condition on length for-injector, including area of the block of phase transformations and area of an ionizer.