

интенсификации фильтрационных процессов в продуктивных нефтяных пластах электроразрядными устройствами типа «Скиф» (приток нефти увеличивается более чем в 3 раза) в различных геолого-технических условиях Украины, России, Казахстана и Китая (более 300 скважин).

Список литературы: 1. Сизоненко О.Н., Колмогорова Р.П., Тафтай Э.И. и др. Влияние добавок поверхностно-активных веществ, обработанных электроразрядом, на реологические параметры нефти // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 11. – С. 79-81. 2. Сизоненко О.Н. Влияние высоковольтного электрического разряда на поверхностные явления в дисперсных системах // Материалы Межд. конф. «Современное материаловедение: достижения и проблемы» (26-30 сентября 2005 г.). – Киев. – 2005. – С. 536-537. 3. Сизоненко О.Н., Райченко А.И. Влияние высоковольтного электрического разряда на поведение композиции углеводородно-минеральная смесь / раствор ПАВ. // Тр. четвертой межд. конференции «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», 18-22 сентября 2006 г. – Жуковка, Автономная республика Крым (Украина). – 2006. – С.155-156. 4. Сизоненко О.Н., Швець И.С., Кучернюк А.В. Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих и нагнетательных скважин // Нефтяное хозяйство. – 2000. – № 12. – С. 133-135. 5. Сизоненко О.Н. Синергетический эффект в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных жидкостью сред при электроразрядном воздействии // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины. – 2003. – Вып. 42. – С.173-186.

Поступила в редколлегию 29.05.2007

УДК 533.951

Е.И.СКИБЕНКО, канд.физ.-мат.наук; **Ю.В.КОВТУН**;
В.Б.ЮФЕРОВ, докт.техн.наук.; ННЦ ХФТИ, Харьков

ФОР-ИНЖЕКТОР РАЗДЕЛЯЕМОГО ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ИОННО-АТОМНЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ. ЧАСТЬ ВТОРАЯ.

Розглянута можливість створення плазмового інжектора на основі пучково-плазмового розряду для іонно-атомних сепараційних технологій. Визначені основні принципи його створення та умови збереження безперервності і постійності потоку розподіляємої речовини по довжині фор-інжектора, включаючи область блоку фазових перетворень та область іонізатора.

The opportunity of creation plasma injector is considered on the basis of the plasma-beam interaction for ionic-nuclear separating technologies. Main principles of his creation and a condition of preservation of a continuity and a constancy of a stream of divided substance on length for-injector, including area of the block of phase transformations and area of an ionizer are determined.

Одной из наиболее трудных научно-технических задач в резонансных магнито-плазменных сепараторах является инжекция плазмы. Поскольку распределение магнитного поля в сепараторе [1-3] представляет собой несколько видоизмененную пробочную конфигурацию, например несимметричные пробки, то способы инжекции и механизмы захвата плазмы сходны с теми, что действуют в пробкотронах. Напомним, что для захвата заряженных частиц магнитным полем обычно используются один или несколько из следующих эффектов: – переменные во времени электромагнитные поля; – изменение зарядового состояния инжектируемых частиц; – парные столкновения или коллективные взаимодействия частиц. При реализации метода так называемой «внешней» инжекции [4] через магнитные пробки важны следующие аспекты: – время инжекции и эффективного захвата плазмы удваивается, если одна из пробок сделана намного больше другой; – механизм инжекции и захвата наиболее эффективен для частиц, входящих под малыми углами ϵ . Таким образом, если через пробку инжектируется поток плазмы с широким интервалом углов спирали, то условие инжекции и захвата выполняется тем дольше и эффективнее, чем меньше углы ϵ . При реализации так называемой «внутренней» инжекции она осуществляется с помощью источников, помещенных частично внутри удерживающего объема. Однако, в настоящее время возможен вариант внутренней инжекции без размещения внутри магнитного поля материальных объектов, на которых может происходить торможение захваченных и удерживаемых частиц после нескольких проходов межпробочного расстояния. Такой вариант внутренней инжекции без материальных объектов внутри и без торможения захваченных частиц на них может быть реализована в случае использования механизма пучково-плазменного взаимодействия для создания плазмы внутри сепаратора. По разным каналам (направлениям) в одну и ту же точку (локальную область) сепарационного объема подается разделяемое вещество и ступок энергии в виде инжектируемого вдоль магнитного поля электронного пучка.

Парадоксальность ситуации, связанной с инжекцией плазмы в сепаратор, заключается в том, что ни один плазменный источник, из числа разработанных для пробкотронов, в чистом виде не может быть использован для заполнения сепаратора плазмой, так как требует согласования и доводки по параметрам плазмы, по конфигурации магнитного поля, тепловым нагрузкам и т.д.

В работе сепарационного плазменного источника (инжектора) можно выделить несколько последовательно выполняемых (происходящих) стадий. В первую очередь – это стадия приготовления рабочего вещества в требуемом фазовом состоянии, то есть парообразном. Для ее стартовой реализации требуются достаточно значительные затраты времени и энергии. Вторая стадия предполагает подачу (транспортировку) разделяемого вещества в паровой фазе в зону ионизации. При этом возможны различные варианты дози-

рованной подачи разделяемого вещества в область пучково-плазменного разряда: – фронтальная подача вещества навстречу электронному пучку; – боковая подача по радиусу системы; – подача разделяемого вещества в спутном потоке в направлении инжекции электронного пучка. По всем трем вариантам ввода (инъекции) предполагается, что вещество может быть доставлено в любую точку сепарационного объема (тракта). Третья стадия – ионизационная (ударная ионизация по линейному закону). Отметим, что в случае пучково-плазменного разряда ионизационная область может быть реализована в любой точке сепарационного объема (тракта), где создана избыточная плотность нейтральных частиц разделяемого вещества порядка 10^{12} см^{-3} . Четвертая стадия – тоже ионизационная, но в этом случае за счет коллективных процессов нарастание плотности происходит уже по нелинейному (экспоненциальному) закону. На пятой стадии происходит нагрев электронов и ионов образовавшейся в пучково-плазменном разряде плазмы за счет электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) и ионно-циклотронного резонанса (ИЦР). Таким образом, многостадийность в работе так называемого плазменного источника позволяет говорить не просто о создании и работе плазменного источника, а о создании и работе более сложного и более функционального устройства – фор-инжектора или фор-источника для заполнения объема сепаратора разделяемым веществом, соответственно, в разные моменты времени в нейтральном или ионизированном состояниях.

В магнито-плазменных резонансных сепараторах, в которых разделение вещества на элементы и их изотопы производится на ионно- атомном уровне, область удерживающего магнитного поля может быть условно разделена на несколько зон: входная зона, зона дрейфа, зона разделения, зона сбора продукта разделения. По функциональным признакам входная зона предназначена для размещения устройств, обеспечивающих трансформацию разделяемого вещества из нейтрального в ионизованное состояние. Зона дрейфа обеспечивает транспортировку плазменного потока, образованного во входной зоне магнитного поля, в зону разделения. В зоне разделения и сбора продуктов разделения реализуется основной технологический процесс сепарационной технологии.

Таким образом, принципиально существует по меньшей мере две возможности создания плазмы разделяемого вещества и, соответственно, два варианта размещения плазменного источника в пределах сепаратора. Размещение плазменного источника во входной зоне представляет собой вариант так называемой «внешней» инжекции корпускулярных и плазменных потоков в магнитном поле сепаратора по терминологии принятой в описании открытых и замкнутых ловушек для удержания термоядерной плазмы [5]. Размещение устройств создания плазмы непосредственно в зоне разделения или использование физических механизмов, обеспечивающих создание плазмы там же, то есть в зоне разделения, реализует вариант внутренней инжекции

плазмы. Рассматриваемый в данной работе фор-источник или фор-инжектор на основе пучково-плазменного разряда является примером реализации внутренней инжекции плазмы в сепаратор. Таким образом, можно считать, что пучково-плазменный разряд применительно к сепаратору – это виртуальный плазменный источник внутреннего размещения. Его достоинства и преимущества по сравнению с внешней инжекцией заключаются в следующем:

- электронный пучок в вакууме и продольном магнитном поле распространяется практически без потерь на любые расстояния в пределах названных цифр (несколько погонных м), то есть плазма может быть образована в любой точке транспортного тракта длиной в несколько м, а именно в зоне разделения;

- в массовом составе образуемой плазмы присутствуют только частицы (ионы, нейтралы) поданного рабочего вещества, и она не загрязняется частицами материалов электродов, диафрагм и т.п., как это имеет место при использовании других методов образования плазмы;

- в условиях пучково-плазменного разряда достигается 100% выгорание нейтралов [6];

- реализация пучково-плазменного разряда допускает использование различных способов подачи рабочего вещества, по сути дела, в любую точку (область) инжекционного тракта.

В [7,8] была высказана и обоснована идея создания плазменного источника (фор-инжектора, в принятой сейчас и здесь терминологии) 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, переходит из твердого в парообразное состояние;

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

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

- 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.

С учетом вышесказанного полная функциональная блок-схема резонансного магнито-плазменного сепаратора с использованием пучково плазменного разряда в качестве внутреннего источника плазмы может выглядеть следующим образом (см. рисунок).



Блок-схема устройства для разделения вещества на элементы

Далее, для сравнения приведены описания блок-схем проекта «Архимед» [2] и установки Карчевского (РНЦ «Курчатовский институт») [3]. Технологическая группа «Архимед» разрабатывает низкотемпературный плазменный фильтр масс (сепаратор) с неполной (частичной) ионизацией вещества, предназначенный для обогащения высокоактивных отходов и дальнейшего их остеклования. Фильтр «Архимеда» представляет собой однопроходное устройство с цилиндрической магнитной областью по оси системы и приложенным радиальным электрическим полем. Материал РАО в виде паров впрыскивается в центральную область устройства, где пары ионизируются с помощью спиральной ВЧ-антенны высокочастотными волнами от внешнего ВЧ-генератора. Разделение ионов по массам производится в соленоидальном магнитном поле, окружающем плазму, с помощью набора концентрических кольцевых электродов, размещаемых на обоих концах плазменного столба и создающих радиальное электрическое поле, направленное перпен-

дикулярно магнитному. Образовавшиеся ионы разделяются по массам и собираются на приемных пластинах – легкие ионы на электродах в торце камеры, тяжелые ионы в центре камеры на боковых поверхностях. Фильтр «Архимеда» способен перерабатывать 1,1 метрическую тонну рабочего вещества в сутки (расчетная производительность). Устройство Карчевского состоит из вакуумной камеры, источника плазмы, состоящего из катода и цилиндрического анода, магнитных катушек, системы подачи рабочего вещества, приемника плазменного потока, а также системы вакуумной откачки, магнитной катушки источника плазмы, сетчатого анода, ВЧ-антенны и ВЧ-генератора, анализатора или отборника проб вещества. Источником литиевой плазмы являлся продольный разряд постоянного тока в парах лития. Цилиндрический анод использовался для поджига продольного разряда. Разряд поддерживался вдоль магнитного поля между катодом и сетчатым анодом. Плазма из области разряда проникала сквозь сетчатый анод и распространялась по магнитному полю в зону действия ВЧ-антенны. Недостатком этого устройства является его конструктивная сложность и многоблочность, необходимость создания и постоянного использования отдельной системы ВЧ-нагрева ионов, состоящей из ВЧ-антенны и ВЧ-генератора. К тому же, при переходе на другой тип рабочего вещества требуется либо перестройка ВЧ-генератора, либо его замена. Кроме того, возможно загрязнение плазмы, проходящей через сетчатый анод, частицами материала сетки за счет его распыления. В то же время в фор-инжекторе (сепараторе) на основе пучково-плазменного разряда инжектируемый электронный пучок решает целую триаду физических и технологических задач – испарение (распыление) твердого вещества, его ионизацию, нагрев образованной плазмы и создание условий для селективного разделения вещества на ионно-атомном уровне. Таким образом, видно, что функционально данный проект имеет свои преимущества по сравнению с литературными источниками [2,3], заключается в конструктивной простоте, повышении надежности устройства в целом и чистоты условий разделения. Действительно, реализация механизма коллективного пучково-плазменного взаимодействия в разряде позволяет наряду с нагревом электронов производить также нагрев ионов, что связано с возникновением в разряде радиального электрического поля, приводящего к вращению плазмы, помещенной в продольное магнитное поле. Относительное движение различных по заряду и массе компонент плазмы приводит к неустойчивости плазмы относительно продольных колебаний вращающейся плазмы и возникновению ионно-циклотронных колебаний с частотой $\omega \sim \omega_{\text{Hи}}$, когда частота вращения становится порядка ионно-циклотронной частоты $\omega_{\text{Hи}}$. Таким образом, вращение плазмы и нагрев ионов происходит за счет самовозбуждающихся электронным пучком ионных циклотронных колебаний в разряде, а не за счет внешнего ВЧ-генератора и ВЧ-антенн, как в аналоге. То есть упрощение конструкции происходит за счет отказа от внешнеразмещаемого ВЧ-генератора и

ВЧ-антенн как в [2,3]. Повышение надежности достигается за счет уменьшения количества составных частей и блоков (узлов) в устройстве в целом. Повышение чистоты условий разделения происходит благодаря исключению возможности попадания в разряд частиц материала электродов, используемых при реализации дуговых распылительных разрядов. Схема предлагаемого устройства представлена в [8]. Устройство содержит вакуумную камеру 1 трубчатой формы, соединенную с узлом подачи разделяемого вещества 2 и узлом подачи поджигающего газа 3. Внутри камеры 1 размещен источник плазмы в виде электронной пушки 4 и приемник плазменного потока в виде пластин 5. При этом ось анодного отверстия электронной пушки 4 размещена под углом к оси камеры 1. Устройство снабжено магнитной системой 6, охватывающей камеру 1. На противоположном от места размещения узла подачи разделяемого вещества 2, узла подачи поджигающего газа 3 и электронной пушки 4 в торце вакуумной камеры 1 размещен коллектор пучка 7. Для запуска и работы предлагаемого устройства [8] производится включение магнитного поля, напуск поджигающего газа, инжекция электронного пучка в область магнитного поля, где он путем ударной ионизации поджигающего газа создает предварительную плазму плотностью 10^{10} см^{-3} . Далее, открывается узел подачи разделяемого вещества и пары разделяемого вещества поступают в объем предварительно созданной плазмы, где происходит их ионизация. При этом ионизация паров разделяемого вещества производится как электронами инжектированного первичного электронного пучка, так и электронами плазмы, образованной при ионизации поджигающего газа. В этом случае плотность плазмы возрастает до 10^{12} см^{-3} .

Рассмотрение концептуального проекта фор-инжектора разделяемого вещества (или сепарирующего устройства в целом) на основе пучково-плазменного разряда для ионно-атомных сепарационных технологий должно отвечать современным требованиям по части технических параметров и производительности устройства в целом. Поэтому параметры сепарирующего устройства могут быть следующими [7]: радиус плазмы $\sim 0,5 \text{ м}$, длина плазменного столба $\sim 4 \text{ м}$, плотность ионной компоненты плазмы $\geq 10^{12} \text{ см}^{-3}$, плазменный поток $4,7 \cdot 10^{21} \text{ част./с}$. Дальнейшие расчеты и оценки будут, проводится 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 $4,7 \cdot 10^{21} \text{ част./с}$, 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 [9]:

$$a_v = 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha \cdot P_s \cdot \sqrt{\frac{M_D}{T_v}}, \quad (1)$$

где a_V – удельная скорость испарения, г/см² 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_{V1} становится существенным. Согласно [10] 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 были выбраны следующие элементы и их соединения: Zr, Bi, Pb, U, UO₂. Расчет производился по формуле (1) при коэффициенте испарения $\alpha=1$, зависимость давления упругости пара от температуры бралась из [11].

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 таблице.

Полное число частиц плазмы $N_{пол.}$ в объеме сепаратора может быть рассчитано по формуле [12]:

$$N_{\text{полн.}} = \int_S n(r) ds(r) = \pi n_{\text{max}} r_0^2 \frac{\gamma}{\gamma + 2}, \quad (2)$$

где n и n_{max} – плотность плазмы и ее максимальное значение, r_0 – максимальный радиус плазменного образования, γ – показатель, характеризующий профиль – тип пространственного распределения плотности плазмы.

При $\gamma = 2$ распределение плотности $\frac{n(r)}{n_{\text{max}}} = 1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^\gamma$ – параболическое, при $\gamma \geq 3$ близкое к равномерному, при $\gamma < 2$ спадающее к периферии.

	\dot{m} , г/с	a_V , г/см ² с	T_{V_2} , К	$T_{\text{пл.}}$, К
Zr	0,719	1 10^{-2}	3189	2133
Bi	1,646	2,5 10^{-2}	1153	544
Pb	1,632	1,8 10^{-2}	1254	600,65
U	1,875	1,7 10^{-2}	2781	1408
UO ₂	2,127	1,7 10^{-2}	2800	3123

Для вышеприведенных размеров сепарирующего устройства полное число частиц на единицу длины сепаратора для параболического распределения плотности плазмы ($\gamma = 2$) составляет $0,39 \cdot 10^{19}$ частиц/м, а для равномерного распределения ($\gamma = 10$), соответственно $0,65 \cdot 10^{19}$ частиц/м.

Известно, что образование пучково-плазменного разряда критично к длине взаимодействия. Это объясняется тем, что существует наименьшая длина, на которой возможно возбуждение колебаний до заметной амплитуды. Минимальная длина взаимодействия, на которой пучок растрчивает свою энергию на возбуждение плазменных колебаний, может быть оценена по формуле [13]:

$$L \approx \frac{v_0}{\gamma} \approx 10^{-8} \frac{E_e}{j} \sqrt{n_p}, \quad (3)$$

где γ – инкремент нарастания амплитуды колебания;

v_0 – направленная скорость электронов в пучке;

E_e – энергия электронов пучка, эВ;

j – плотность тока пучка, А/см²;

n_p – концентрация плазмы, см⁻³.

С ростом длины взаимодействия электронного пучка с плазмой, амплитуда колебаний растет, и при определенных длинах она может достигать величины достаточной для дополнительной ионизации газа. Начиная с этой длины, и возникает плазменно-пучковый разряд.

Видно, что диапазон расчетных значений эффективной длины ППВ простирается от долей см до десятков и сотен см. Для реально получаемых токов электронного пучка (10 – 20 А) при поперечных размерах $2R \sim 1$ см

имеем плотность тока $j \sim 10 - 25 \text{ А/см}^2$ и, соответственно, длины взаимодействия $L \sim 10\text{-}20 \text{ см}$. При более высоких значениях плотности тока, например, $\leq 100 \text{ А/см}^2$, требуемые длины взаимодействия остаются на том же уровне или несколько уменьшаются.

Для реализации данного проекта существенным является вопрос об энергетических затратах на образование плотной (выше плотности электронного пучка) плазмы в условиях пучково-плазменного разряда. Экспериментально показано, что на создание в пучково-плазменном разряде аргоновой плазмы плотностью $6 - 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ требуются удельные затраты мощности около 100 Вт/см^3 . С учетом времени образования плотной плазмы, которое составляет в среднем $5 - 50 \text{ мкс}$ энергозатраты на ионизацию равны $5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^3$. Для демонстрационного варианта сепаратора суммарные ионизационные затраты для однократно ионизованной плазмы составят от 500 до 5000 Дж. Для криптоновой и ксеноновой плазмы эти затраты практически останутся на том же уровне в соответствии с величинами сечений и потенциалов ионизации [14].

Таким образом, пучково-плазменный механизм образования плотной, горячей, высокоионизированной плазмы дает основание для проработки и реализации на его основе плазменного источника для сепарационных устройств и технологий.

Список литературы: 1. *О.М.Швец, В.Б.Юферов, Е.И.Скибенко и др.* // Труды Украинского Вакуумного Общества. – Т. 1. – Киев. – 1995. – С. 195. 2. *A.Litvak, S.Agnev, F. Anderegg et al.* // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg. – 7-11 July 2003. – ECA Vol. 27A, O-1.6A. 3. *А.И.Карчевский, В.С.Лазько, Ю.А.Муромкин и др.* // Физика плазмы. – Т. 19, вып. 3. – 1993. – С. 411. 4. *Р.Пост* // Высокотемпературная плазма и управляемые термоядерные реакции. – М.: ЦИЛ, 1961. – 118 стр. 5. *Л.А.Арцимович* // Управляемые термоядерные реакции. – М.: ГИФМЛ. – 1961. – 468 с. 6. *I.Alexeff, L.A.Barry, J.M.Dudley et al.* // Phys. Rev. – 1964. – Vol. 136. – P. 689. 7. *Е.И.Скибенко, В.Б.Юферов, Ю.В.Ковтун* // Концептуальный проект плазменного источника на основе пучково-плазменного разряда для сепарационных технологий. Сборник докладов ОТТОМ-8. – Харьков, 2007. – Т. 1. – С. 232-238. 8. Заявка на полезную модель № U200702787 от 16 марта 2007. 9. *J.Langmuir* // Phys. Rev. – 1913. – Vol. 2, № 5. – P. 329-342. 10. *B.Wenzel* // Forschungsinstitut M. von Ardenne. – Dresden, 1974. – personl. Mitt. 11. *А.И.Ефимов и др.* Свойства неорганических соединений. Справочник. – Химия, 1983. – 392 с. 12. *М.Ю.Бреидихин, А.И. Маслов, А.И.Скибенко и др.* // ЖТФ. – 1974. – Т. 44, № 1. – С. 83. 13. *Я.Б.Файнберг* // АЭ. – 1961. – Т. 11. – С. 313. 14. *R.Rejoub, B.G. Lindsay and R.F.Stebbing* // Physical Review A. – 2002. – Vol. 65, 042713.

Поступила в редколлегию 04.06.2007.