

## **ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РТУТИ В ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМПАХ И ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ К ИХ УТИЛИЗАЦИИ**

*К.г.-м.н.Е.П. Янин*

Институт геохимии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского РАН, Москва  
yanin@geokhi.ru

Рассматривается поведение и перераспределение ртути, присутствующей в люминесцентных лампах, в ходе их эксплуатации. Показано, что подавляющая часть металла накапливается в люминофоре. Этот факт является основой для разработки способов утилизации отработанных («перегоревших») ртутных люминесцентных ламп.

Масштабы использования и экономическая значимость ртутных (особенно люминесцентных) ламп все еще достаточно велики. Ртутные лампы используются для освещения улиц, жилых, общественных и промышленных помещений, местного освещения, в медицинских и оздоровительных целях, в прожекторных установках, светокопировальных аппаратах, на сельскохозяйственных объектах и т. д. Массовое применение ртутных ламп (особенно низкого давления) во многом обусловлено их высокой световой отдачей, большим сроком службы (по сравнению с обычными лампами накаливания) и возможностью получения разнообразных спектров излучения, широкого диапазона мощностей, яркости [1, 4, 14]. Отработанные ртутные лампы являются источниками загрязнения окружающей среды токсичной ртутью и некоторыми другими опасными веществами [5, 15–20]. Именно поэтому в России отработанные (использованные) ртутные лампы включены в «Федеральный классификационный каталог отходов» как отходы, обладающие 1-м классом опасности для окружающей среды и подлежащие обязательному обезвреживанию (переработке) с использованием соответствующих технологий [15]. Постановлением Правительства РФ от 3 сентября 2010 г. № 681 утверждены «Правила обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде». Указанные Правила обязательны для юридических лиц (независимо от организационно-правовой формы) и индивидуальных предпринимателей, в том числе осуществляющих управление многоквартирными домами на основании заключенного договора или заключивших с собственниками помещений многоквартирного дома договоры на оказание услуг по содержанию и ремонту общего имущества в таком доме (юридические лица и индивидуальные предприниматели), а также физических лиц.

Ртутная лампа представляет собой газоразрядный источник света, в котором используется излучение (главным образом в УФ и видимой областях спектра) электрического разряда в парах ртути или в смеси газа (чаще всего аргона) и пара металла [4, 8, 9, 13]. Для наименования всех видов таких источников света в отечественной светотехнике используется термин «разрядная лампа» (РЛ), включенный в состав Международного светотехнического словаря, утверждённого Международной комиссией по освещению. По рабочему давлению в колбе ртутные лампы бывают: а) низкого давления, в которых парциальное давление паров ртути при установившемся режиме не превышает  $10^2$  Па, б) высокого давления (от  $10^5$  до  $10^6$  Па) и сверхвысокого давления ( $10^6$  Па и более). По форме стеклянной колбы ртутные лампы подразделяются на: 1) трубчатые или линейные лампы в цилиндрических колбах (расстояние между электродами в 2 раза и более превышает внутренний диаметр трубки); 2) капиллярные лампы (в трубках с внутренним диаметром меньше 4 мм); 3) шаровые лампы (их колбы часто имеют форму шара или близкую к ней). Колбы ртутных ламп могут быть покрыты или непокрыты слоем люминофора. Различают также лампы, в которые вводится металлическая (жидкая) ртуть, и лампы, в которых жидкая ртуть заменяется амальгамой (благодаря меньшему давлению паров ртути над амальгамой лампа становится более приемлемой в производстве и эксплуатации). В наибольшем объеме выпускаются линейные (трубчатые) люминесцентные лампы (ЛЛ) и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ) – разрядные лампы низкого давления, в которых ультрафиолетовое излучение электрического разряда в парах ртути превращается при помощи слоя люминофора, нанесенного на внутреннюю поверхность стеклянной колбы, в видимое оптическое излучение различной цветности. Составной частью ЛЛ является трубчатая (цилиндрическая) стеклянная колба, по обоим концам которой впаяны ножки с катодами (рис. 1).



Рис. 1. Устройство типичной люминесцентной лампы.

Катод обычно представляет собой биспираль из вольфрамовой проволоки, покрытую тонким слоем оксидов щелочноземельных металлов. Цоколь лампы изготавливается, как правило, из алюминия; в лампах присутствуют также медь (выводы, латунные штырьки), никель (выводы), цинк (латунные штырьки), олово (припой), свинец (припой и ножка) и некоторые другие химические элементы. В колбу лампы (после удаления воздуха и тщательного обезгаживания) вводится инертный газ (аргон, ксенон, неон, аргоно-неоновая или аргоно-криптоновая смесь), который облегчает зажигание лампы и уменьшает распыление катодов в процессе работы. Внутренняя поверхность стеклянной колбы покрыта люминофором. Электроды ЛЛ представляют собой вольфрамовые нити, покрытые пастой (активной массой) из щелочноземельных металлов. Эта паста и обеспечивает стабильный дуговой разряд и предохраняет вольфрамовые нити от перегрева. В процессе работы она постепенно осыпается с электродов, выгорает и испаряется. Особенно интенсивно она осыпается во время запуска, когда некоторое время разряд происходит не по всей площади электрода, а на небольшом участке его поверхности, что приводит к локальным перепадам температур. Отсюда потемнение на концах лампы, часто наблюдаемое ближе к окончанию срока службы. Когда паста выгорит полностью, ток лампы начинает падать, а напряжение, соответственно, возрастать.

ЛЛ, в отличие от лампы накаливания, не может быть включена напрямую в электрическую сеть. Причин для этого две: 1) для зажигания дуги в люминесцентной лампе требуется предварительный прогрев электродов и импульс высокого напряжения; 2) люминесцентная лампа имеет отрицательное дифференциальное сопротивление, после зажигания лампы ток в ней многократно возрастает и если его не ограничить, лампа выйдет из строя. Для решения этих проблем применяют специальные устройства – балласты (пускорегулирующие устройства, пускорегулирующий аппарат – ПРА). Наиболее распространённые схемы: электромагнитный балласт (ЭМПРА) с неоновым стартером и (сейчас преобладают) различные разновидности электронных балластов (ЭПРА).

Стандартная бытовая КЛЛ представляет собой люминесцентную лампу, вставленную в керамический цоколь с интегрированным электронным балластом (рис. 2). Уменьшение габаритов лампы позволило сократить применение ртути более чем в 10 раз (до 2–5 мг), причем в амальгамных КЛЛ ртуть находится в связанном состоянии. Пожаро- и взрывобезопасность, а также защита от поражения потребителя электрическим током возросли на порядок, кроме того, качественные КЛЛ от ведущих производителей, как правило, имеют защиту от перегрузок по току, защиту при повреждении излучающего блока, травмобезопасные неизвлекаемые цоколи и ряд других усовершенствований, направленных на обеспечение безопасности эксплуатации лампы.

Уменьшение габаритов КЛЛ позволило применять их как в отдельной осветительной установке, так и для прямой замены ламп накаливания в светильниках со стандартными патронами, рассчитанными на использование резьбового «эдисоновского» цоколя. В силу своих конструктивных особенностей КЛЛ имеют ещё одно преимущество: диапазон их цветовой температуры необычайно широк (2700–6000 К), что даёт возможность создавать свет самого разного спектрального состава (тёплый, естественный, белый, дневной). Подавляющее большинство КЛЛ оснащены электронным пускорегулирующим аппаратом (ЭПРА), которые используются вместо стартеров, электромагнитных дросселей и конденсаторов. ЭПРА значительно

энергоэкономичней, чем традиционные электромагнитные ПРА, так как потери мощности в балласте не происходит, кроме того, ЭПРА гарантируют практически мгновенное включение лампы. В отличие от ЛЛ, имеющих традиционные ПРА, КЛЛ с ЭПРА не имеют оптических (пульсация светового потока) и акустических (шум) эффектов, что делает их относительно безвредными для человеческого зрения и позволяет применять их в любых помещениях. Если сравнить КЛЛ с лампой накаливания одной и той же яркости, то окажется, что расходы на электроэнергию при использовании КЛЛ сокращаются на 80%. Большая часть КЛЛ рассчитана на установку в стандартные резьбовые патроны для ламп накаливания (цоколь Е27) и компактные «миньоны» (Е14). Единственное (пока) ограничение – габариты. Компактные люминесцентные лампы обычно все-таки немного больше стандартных ламп накаливания и могут не поместиться в светильники с маленькими плафонами.

В табл. 1 приведены сведения, характеризующие уровни содержания ртути в люминесцентных лампах, выпускаемых российскими и зарубежными (Philips, Osram, General Electric Lighting и др. ведущие представители этой отрасли) электроламповыми заводами.



Рис. 2. Устройство типичной компактной люминесцентной лампы (УФ – ультрафиолетовое излучение).

Таблица 1

**Наиболее типичные содержания ртути в различных типах ламп [19]**

Группа ламп	Количество ртути в лампе, мг	
	Россия и СНГ	Зарубежные производители
Люминесцентные (трубчатые)	20-40	< 10-50
Люминесцентные компактные	≤ 5	< 3-5

Для разработки и дальнейшего совершенствования технологий переработки использованных ламп особый интерес представляет знание особенностей взаимодействия между ртутью и разными компонентами лампы и,

прежде всего, выявление тех компонентов отработанной лампы, которые являются ее основными носителями. Особое значение имеет также установление форм нахождения (закрепления) ртути в этих компонентах.

По данным Национальной ассоциация изготовителей электрооборудования США, в современных люминесцентных лампах марки T12 содержится около 0,2% (0,042 мг) элементарной ртути (парогазовая фаза, Hg<sup>0</sup>) и 99,8% (20,958 мг) двухвалентной ртути (Hg<sup>2+</sup>), инкорпорированной в люминофор (табл. 2). Аналогичное распределение ртути характерно и для лампы марки T8 (табл. 3).

Таблица 2

**Содержание ртути в люминесцентной лампе T12, мг/лампа [26]**

Год	Элементарная	Двухвалентная	Общая
до 1992	0,082	40,918	41
1992-1996	0,060	29,940	30
1997-2007	0,042	20,958	21

Таблица 3

**Количество ртути в люминесцентной лампе T8, мг/лампа [26]**

Год	Элементарная	Двухвалентная	Общая
до 1992	0,06	29,94	30
1992-1996	0,03	14,97	15
1997-2007	0,02	9,98	10

Специальными исследованиями установлено, что если в новых (неиспользованных) ЛЛ ртуть присутствует преимущественно в виде паровой фазы элементарной ртути [22, 28, 29], то в отработанных лампах – в адсорбированных на люминофоре формах (соединениях), в меньшей степени – на стекле и других компонентах [28]. По данным [22, 29], в процессе эксплуатации ЛЛ пары ртути взаимодействуют с люминофором и стеклом, в результате в лампе образуются разнообразные соединения (комплексы) ртути, среди которых идентифицированы элементарная ртуть, фиксированные (внедренные в стеклянную матрицу) и окисленные растворимые формы ртути.

Авторы [25] установили, что в колбе использованной лампы только 0,04-0,17% ртути (от всего введенного в лампу в процессе ее изготовления количества металла) присутствует в виде паров. Более 94% ртути, присутствующей в отработанной лампе, было связано люминофором.

Детальные исследования поведения и форм нахождения ртути в люминесцентных лампах были относительно недавно выполнены бразильскими исследователями [28]. В своих экспериментах авторы изучали поведение ртути в наиболее широко распространенных линейных (трубчатых) 20–40 Вт люминесцентных лампах (новых и использованных) с применением современных аналитических методов (термодесорбция/атомная абсорбционная спектрометрия, рентгенодифракционный, метод холодного пара, атомно-эмиссионная спектрометрия/индуктивно-связанная плазма). Было установлено, что в люминофор из лампы представлен в основном фосфатом кальция (кристаллическим фторапатитом Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F); среди других основных фаз установлены

кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ), монит ( $\text{CaHPO}_4$ ), брушит ( $\text{CaHPO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ), рутил/анатаз ( $\text{TiO}_2$ ), витлокит ( $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ). В табл. 4 приведен примерный химический состав люминофора. Кроме того, в люминофоре в малых (следовых) концентрациях присутствовали Cu, Mn, Pb, Sb, Sn и другие редкие земли. Естественно, что первоначально люминофор свободен от ртути, поскольку она вводится в лампу в ходе ее производства.

Таблица 4

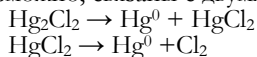
**Примерный химический состав люминофора, используемого в 40 Вт ЛЛ марки Т12 (длина 122 см, диаметр 3,8 см)**

Элемент	Содержание
	% масс.
Ca	37,91 ± 0,11
P	18,12 ± 0,36
F	2,95 ± 0,14
Mn	0,86 ± 0,02
Cl	0,72 ± 0,04
Sb	0,61 ± 0,01
Fe	0,19 ± 0,01
Cd	0,18 ± 0,01
	мг/кг
Al	580 ± 30
Ba	310 ± 15
Mg	143 ± 2
Sr	125 ± 7
Ni	90 ± 4
Pb	38 ± 3
Cr	10 ± 1
Zn	7 ± 1
Co	4 ± 1
La	35 ± 4
Nd	31 ± 3
Ce	12 ± 1
Sm	6 ± 0,3
Dy	3 ± 0,3
Er	3 ± 0,3
Ho	2 ± 0,3

На рис. 3 приведена термограмма люминофора, искусственно меченого («зараженного») стандартными соединениями ртути –  $\text{Hg}^0$ ,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{HgO}$ . Её анализ показал следующее.

1)  $\text{Hg}^0$  – основная десорбция этой фазы ртути имеет место при низких температурах (от комнатной до  $180^\circ\text{C}$ , максимум при  $150^\circ\text{C}$ ). Пик имеет заостренную (островершинную) форму).

2)  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  – интенсивный пик этого соединения появляется при температурах от  $100$  до  $250^\circ\text{C}$ , с максимумом при  $225^\circ\text{C}$  и небольшим пиком-уступом в интервале от  $250$  до  $350^\circ\text{C}$ , что может быть объяснено образованием  $\text{HgCl}_2$  при разложении некоторого количества  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . Эти два пика, возможно, связаны с двумя стадиями разрушения, согласно уравнению:



3)  $\text{HgCl}_2$  – это соединение при нагреве дает размытый пик между 150 и  $340^\circ\text{C}$  (максимум примерно при  $275^\circ\text{C}$ ).

4)  $\text{HgO}$  – основная термодесорбция этого соединения наблюдается при температурах в интервале от  $250$  до  $500^\circ\text{C}$  с максимумом примерно  $400^\circ\text{C}$ . Отмечается также размытый пик в интервале  $380$ – $430^\circ\text{C}$ .

В общем случае интенсивность термодесорбции различных соединений ртути из люминофора имеет следующий (по мере возрастания температуры нагрева образца) порядок:  $\text{Hg}^0 < \text{Hg}_2\text{Cl}_2 < \text{HgCl}_2 < \text{HgO}$ .

Аналогичные эксперименты были проведены с люминофором из новых и использованных люминесцентных ламп (табл. 5, рис. 5, 6).

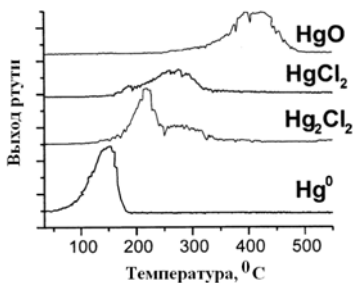


Рис. 3. Термограмма люминофора, меченого стандартными соединениями ртути.

Таблица 5

**Ртуть в различных компонентах люминесцентных ламп**

Номер образца	Образец лампы	Ртуть, мкг/г	Формы ртути	
			Основные	Второстепенные
Люминофор отработанных ЛЛ				
LF01	F40T12/LDP	4000 ± 400	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^+, \text{Hg}^{2+}$
LF02	F40T12/LDP	8900 ± 900	$\text{Hg}^{2+}$	
LF03	F40T12/LD/U	3500 ± 400	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^+, \text{Hg}^{2+}$
LF04	F40T12/ELD	6300 ± 600	$\text{Hg}^0, \text{Hg}^+$	$\text{Hg}^{2+}$
LF05	F40T12/LDE	6700 ± 700	$\text{Hg}^+$	
LF06	F40T12/LDE	13300 ± 1300	$\text{Hg}^+$	$\text{Hg}^0, \text{Hg}^{2+}$
LF07	F40T12/ELD	3600 ± 400	$\text{Hg}^+$	$\text{Hg}^0$
LF08	F40T12/SLD, Duramax	1430 ± 130	$\text{Hg}^0$	
LF09	F40T10/LDE	2100 ± 200	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^{2+}$
LF10	F20T12/SLD, Duramax	1700 ± 150	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^+$
Люминофор новых ЛЛ				
LF11	F40T12/SLD, Duramax	750 ± 80	$\text{Hg}^0, \text{Hg}^+$	
LF12	F40T10/LDE	330 ± 30	$\text{Hg}^{2+}$	
LF13	F40T12/SLD, Duramax	760 ± 80	$\text{Hg}^0, \text{Hg}^+$	
LF14	F40T12/SLD, Duramax	800 ± 50	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^+$
LF15	F40T12/SLD, Duramax	750 ± 60	$\text{Hg}^0$	
LF16	F40T10/LDE	300 ± 30	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^+$
LF17	F40T12/SLD, Duramax	950 ± 40	$\text{Hg}^0$	$\text{Hg}^+$
Известково-натриевое стекло ЛЛ, нг/г				
1	Использованная лампа	4300 ± 400	(?) $\text{Hg}^+, \text{Hg}^{2+}$	
2	Новая лампа	18 ± 2	-	

Результаты термодесорбционного анализа показывают, что в основных компонентах ламп присутствуют окисленные формы ртути ( $\text{Hg}^+$  и  $\text{Hg}^{2+}$ ), которые являются мобильными, в сущности, именно их присутствие и обуславливает опасность отходов. В стекле использованных ламп присутствует ртуть, прочно связанная с его матрицей. Она десорбируется только при высоких температурах.

Существует предположение, что в данном случае двухвалентная ртуть образуется из  $\text{HgO}$  в результате реакции  $\text{Hg}^0$  со свободным кислородом, который генерируется при разложении оксидов щелочных металлов в электрической разрядной зоне лампы.

Сравнивая термограммы на рис. 4 с термограммой на рис. 4 (для  $\text{HgO}$ ), видим, что только образец LF02 имеет сигнал, похожий на этот оксид. Авторы цитируемой работы [28] отмечают, что в настоящее время некоторые патенты в США предлагают органические комплексообразующие агенты (например, аскорбиновую кислоту –  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$  и глутамат натрия –  $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NaO}_7$ ), которые могут инкорпорироваться в люминофор и/или цементировать основную матрицу в ходе изготовления ламп с целью снижения выпелачиваемости ртути при использовании теста токсичности для отходов или в случае конечного захоронения отработанных ламп и их компонентов. Другой альтернативой является внедрение антиокисляющего агента в структуру лампы, таких как железо, соединения марганца, медь, а также галогенные соединения ( $\text{NaBr}$ ,  $\text{NaCl}$ ). Стекло исследованных люминесцентных ламп имело следующий основной состав, %:  $\text{SiO}_2 - 69,2 \pm 1,4$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3 - 16,5 \pm 0,5$ ,  $\text{CaO} - 4,2 \pm 0,2$ ,  $\text{Na}_2\text{O} - 3,1 \pm 0,2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 2,7 \pm 0,1$ ,  $\text{K}_2\text{O} - 1,8 \pm 0,1$ ,  $\text{MgO} - 1,4 \pm 0,1$ ,  $\text{PbO} < 0,1$ .

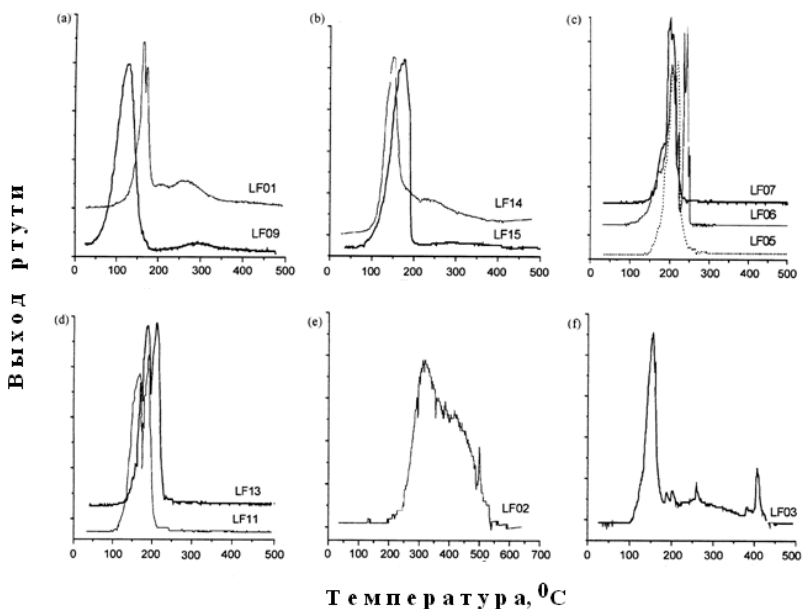


Рис. 4. Термограмма образцов люминофора из использованных и новых ЛЛ (номера образцов – см. табл. 5).



На рис. 5 приведена термограмма стеклянной матрицы отработанной люминесцентной лампы с концентрацией ртути порядка  $4300 \pm 400$  нг/г (образец 1 – см. табл. 5). Как следует из термограммы, основная десорбция ртути из стекла происходит в интервале температур от 240 до 800 $^{\circ}$ C, максимальный пик 618 $^{\circ}$ C. Важно отметить, что данный температурный интервал не сопоставим с любым известным специфическим ртутным стандартом. По предположению [22], в данном случае большая часть ртути сильно хемisorбируется натрием стекла или образует интерметаллическое соединение с этим элементом, т. е. ртуть присутствует в виде Hg $^0$ . Другие исследователи [23] утверждают, что внутри лампы происходят специфические электрохимические реакции, в том числе окисление ртути в результате плазмообразования. Окисленная ртуть может диффузировать в матрицу стекла. Термограмма на рис. 6, как предполагают авторы [28], подтверждает эту гипотезу, поскольку сигнал появляется только после температуры в 200 $^{\circ}$ C и отвечает окисленным формам ртути (Hg $^+$  и Hg $^{2+}$ ). Свободной ртути в матрице (или на матрице) стекла нет.

Абсорбционный сигнал для стекла новых ламп (образец 2 в табл. 5 с концентрацией ртути  $18 \pm 2$  нг/г) был практически равен нулю (для образца равной массы, который использовался для отработанной лампы = 200 мг). Это показывает, что взаимодействие ртути пропорционально времени использования лампы [23] и зависит от физико-химических процессов, которые имеют место внутри лампы [22].

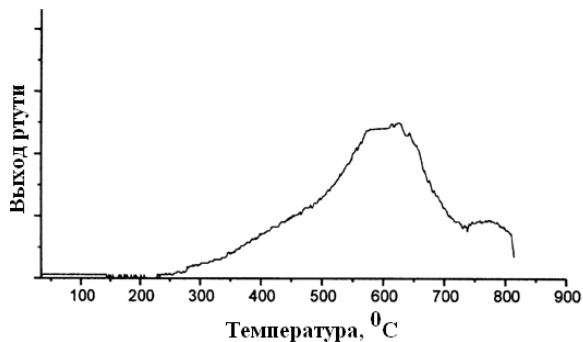


Рис. 5. Термограмма образца стекла использованной люминесцентной лампы

В работе [21], выполненной авторами из Тайваня, где очень высока доля переработки ламп, исследовались характеристики люминофора, извлеченного из отработанных ЛЛ (использовались индуктивно-связанная плазма и рентгено-структурный анализ). Основная цель работы заключалась в изучении обработки и характеристик восстановленного люминофора в сравнении со «свежим». Необходимость подобных исследований обусловлено тем, что в настоящее время в мире большинство переработчиков отработанных люминесцентных ламп применяет так называемые сухие процессы [27]. Как отмечают авторы [21], до сих пор несколько технологий переработки ЛЛ, включая разработанные Advanced Environmental Recycling Corp. (США), Mercury Recovery Services (США), Safety Support Service (Япония), SepaDyne (Япония), MRT system (Швеция), были направлены на регенерацию ртути (с очисткой ее до 99,999%) из люминофора отработанных ламп, причем

люминофор, обычно содержащий переходные металлы и редкие земли, затем повторно использовался. Тем не менее влияние сухих процессов рециклинга на физические характеристики и функциональные свойства восстановленного люминофора изучены слабо.

Таблица 6

**Состав регенерированного и свежего люминофора, % масс.**

Компонент	Свежий люминофор	Регенерированный люминофор
CaO	50,9	49,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	35,7	34,9
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,28	3,09
F	2,48	2,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,21	1,16
SrO	1,14	1,13
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,04	0,91
MnO	0,80	0,82
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,79	0,97
C	0,63	0,70
BaO	0,54	0,83
Cl	0,50	0,44
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20	-
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0,20	0,16
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18	0,19
SiO <sub>2</sub>	0,14	1,88
ZnO	0,10	0,02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05	0,12
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,33
SO <sub>3</sub>	0,04	0,06
HgO	0,03	-
GeO <sub>2</sub>	0,02	0,02
PbO	-	0,23
MgO	-	0,09
K <sub>2</sub> O	-	0,06

Пробы люминофора были отобраны из использованных ламп, переработанных с применением технологии обрезки концов (MRT system, Швеция). В этой технологии использованные лампы подаются в машину автоматически и затем проходят несколько этапов обработки, включая идентификацию лампы, обработку трубки горелкой, обрезку концов, удаление ртутьсодержащего люминофора со стекла продувкой воздухом. Люминофор различного качества собирается в нижней части цилиндрического циклона. Эмиссия ртути в воздух настолько ничтожна, что не принимается во внимание. Люминофор затем подвергается очистке, которая включает дистилляцию и ситование. Термальная десорбция/дистилляция осуществлялась при температуре выше точки кипения ртути (375°C). Цель последующего просеивания состоит в избавлении от мелких частиц стекла и электродов. В табл. 6 приведен состав свежего (заводского) и регенерированного люминофора.

Заводской люминофор в основном состоит из Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(F,Cl):(Sb,Mn) (галлофосфат). В регенерированном люминофоре, помимо галлофосфата, содержится небольшое количество редкоземельных элементов, включая La, Gd, Tb, Eu. Микроснимок (сканирующая электронная микроскопия) регенерированного люминофора в сравнении со свежим люминофором приведен на рис. 6.

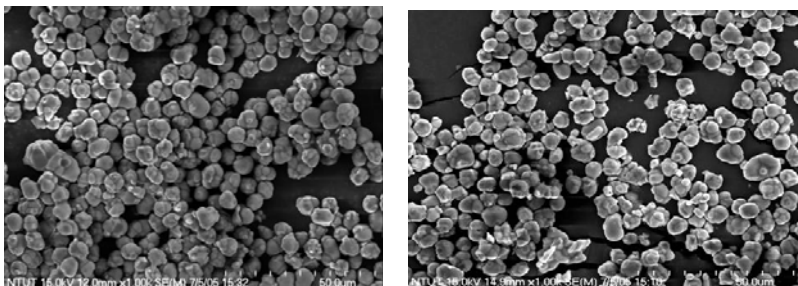


Рис. 6. Микроснимки восстановленного (вверху) и свежего (внизу) люминофора

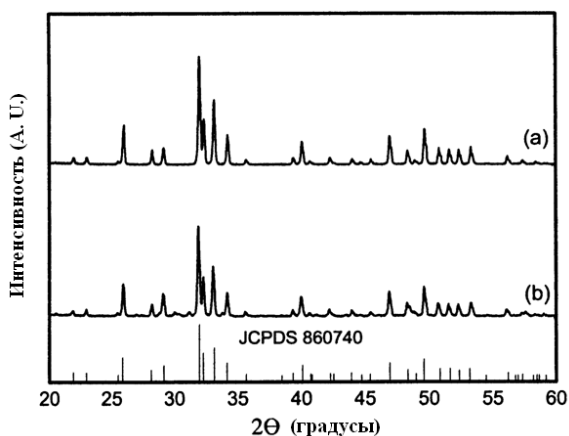


Рис. 7. XRD диаграммы для регенерированного (а) и свежего (б) люминофоров

Хотя мы имеем схожее бимодальное распределение частиц по размерам, регенерированный люминофор (6,5 мкм) имел более мелкие размеры, нежели свежий, что является следствием его эрозии в течение процессов рециклинга. Микроснимки (рис. 8) показывают, что процессы переработки (рециклинга) не вносят существенного изменения в гранулометрический состав и морфологию частиц регенерированного люминофора по сравнению со свежим (заводским) люминофором. Несмотря на то, что физические характеристики регенерированного и свежего люминофора существенно не различаются, рентгено-дифракционный анализ показал несомненное появление вторичной фазы в генерированном люминофоре, в дополнение к галофосфатному люминофору (рис. 7). Вторичная фаза может быть связана с примесями от стеклянной трубки, которые согласуются с

внешним видом  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ . Эти остатки являются типичными компонентами стекла люминесцентных ламп. Спектральное распределение энергии свежего и регенированного галофосфата (люминофора) показано на рис. 8. Как видим, оба люминофора показывают сильную адсорбцию вблизи УФ зоны. Кривая возбуждения имеет ясный пик для свежего люминофора и широкую полосу для регенированного люминофора.

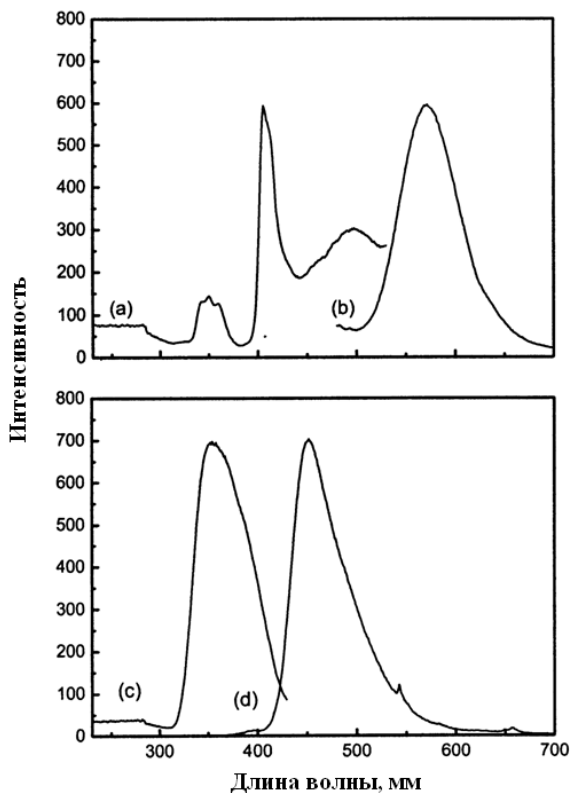


Рис. 8. Энергетический спектр свежего и регенированного люминофора: (a) и (b) спектры излучения и эмиссии свежего люминофора; (c) и (d) то же, регенированного люминофора

В работе [6] детально изучены процессы влияния различных демеркуризационных препаратов на люминофор и стеклобой, являющихся основными продуктами переработки люминесцентных ламп при их утилизации вибропневматическим способом. Анализ компонентов лампы осуществлялся методом атомной абсорбции при непрерывном линейном нагреве пробы до  $800^\circ\text{C}$  с последующим детектированием образовавшейся атомарной Hg на анализаторе ИМГРЭ-900 [3]. Для дополнительной идентификации указан-

ных продуктов был использован метод рентгеноструктурного анализа [2]. Данные термического анализа люминофора подтверждаются результатами аналитического исследования: содержание элементарной ртути в люминофоре составляет 87,4–91,2 % от ее общего количества. Полученные результаты согласуются также с литературными данными, по которым температура максимального выхода атомарной ртути находится в интервале 70–160°C. Обработка люминофора демеркуризационными препаратами на основе сульфида и полисульфида натрия приводит к снижению содержания в нем атомарной ртути, т. е. доля термоформы, возгонка которой происходит при температуре до 140°C, уменьшается. При этом демеркуризационный эффект препарата на основе сульфида натрия зависит от концентрации используемого раствора: если 2%-ный раствор  $\text{Na}_2\text{S}$  незначительно снижает содержание свободной ртути (с 89,6 % в исходном, не демеркуризованном люминофоре, до 66,8 % в обработанном), то применение 20%-ного раствора  $\text{Na}_2\text{S}$  позволяет уменьшить концентрацию атомарной ртути до 13,9%. Как следует из табл. 7, максимальное преобразование свободной ртути в соединения достигается при воздействии на люминофор раствора полисульфида натрия. В этом случае содержание атомарной ртути составляет 2,2 % от ее общего количества в люминофоре.

Результаты термического анализа продуктов демеркуризации материала «стеклобой + люминофор», приведенные в табл. 8, в целом согласуются с данными по демеркуризации люминофора (см. табл. 7). В этом случае максимальный демеркуризационный эффект также достигается при обработке материала полисульфидным препаратом: воздействие 30%-ного раствора полисульфида натрия приводит к снижению содержания свободной ртути до 2,3 %.

Таблица 7

**Влияние различных препаратов на процентное содержание различных форм ртути в люминофоре**

Наименование препарата, использованного для демеркуризации	Интервал температур, °С				
	<140	140-240	240-340	340-480	>480
Люминофор, не обработанный демеркуризатором	89,6	5,3	1,6	2,4	1,0
2 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}$	66,8	12,6	7,7	10,1	2,82,8
20 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}$	13,9	76,5	4,8	3,8	1,0
30 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}$	14,0	76,1	4,8	4,0	1,1
40 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}$	13,8	76,0	5,0	4,3	0,9
20 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}+\text{S}$	2,2	60,0	22,6	12,4	2,8

Таблица 8

**Влияние демеркуризаторов на процентное содержание термоформ ртути в материале «стеклобой + люминофор»**

Наименование препарата, использованного для демеркуризации	Интервал температур, °С				
	140	140-240	240-340	340-480	480
20 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}$	17,0	44,3	24,1	10,0	4,5
30 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}$	14,2	41,8	28,1	13,0	3,0
30 %-ный р-р $\text{Na}_2\text{S}+\text{S}$	2,3	60,0	25,2	9,3	3,3

Для оценки эффективности демеркуризации, наряду с данными о количестве свободной ртути, необходимо располагать информацией о виде соединений, в которые преобразуется ртуть, и об их устойчивости. Как следует из табл. 7 и 8, основной формой содержания ртути в продуктах демеркуризации, образующихся при воздействии 20, 30 и 40%-ных растворов сульфида натрия, является соединение, термоформе которого соответствует интервал температур 140–240°C. При использовании в качестве демеркуризатора раствора полисульфида натрия, указанное соединение продолжает доминировать; вместе с тем возрастает доля термоформы с температурным интервалом 240–340°C. Выполняя идентификацию указанных форм ртути, авторы исходили из предположения, что в продуктах демеркуризации, выполненных препаратами, содержащими ион сульфида и избыток серы, должен образовываться сульфид ртути. Химический анализ продуктов демеркуризации, образовавшихся при воздействии полисульфида натрия, позволил установить, что доля соединения, которое по характеру растворимости может быть идентифицировано как сульфид ртути, составляет 21,6–24,0 %. Сопоставление этих данных с результатами термического анализа показывает, что процентное содержание соединения ртути, близкое к вышеприведенному, соответствует термоформе с интервалом температур 240–340°C. Термический анализ эталона химически чистого сульфида ртути (рис. 9) подтверждает, что соединение, термоформа которого отвечает температурному интервалу 240–340°C, может быть идентифицировано как HgS. Проведенная идентификация не противоречит литературным данным.

Соединение, выход ртути у которого соответствует интервалу температур 300–360°C, на основании сопоставления с эталоном и при сравнении с литературными данными, также могло бы быть идентифицировано как сульфид ртути. Однако результаты химического анализа люминофора, выполненного непосредственного после демеркуризации растворами, показали, что доля соединения, по растворимости соответствующего сульфиду ртути, составляла всего 4,1–5,0 %. Полученный результат не позволяет идентифицировать сульфид ртути в продуктах демеркуризации, составляющее 76,0–76,5 %.

Рентгеноструктурный анализ люминофора, проведенный спустя 6 мес. после демеркуризации 30%-ным раствором сульфида натрия, показал, что основная форма Hg в люминофоре является сульфидная (рис. 10). Это позволяет рассматривать форму Hg с интервалом температур 140–240°C как химически сорбированную сульфидным ионом ртути, т.е. как «предсульфидное» образование, со временем переходящее в сульфид ртути. Следует отметить, что наряду с процессом формирования сульфида ртути, в люминофоре, подвергнувшись демеркуризации, происходит высвобождение атомарной ртути. Так, результаты термического анализа люминофора, выполненные через год после демеркуризации, свидетельствуют о наличии свободной ртути (рис. 11; термовозгонка этой формы ртути осуществлялась при температуре до 140°C).

В табл. 9 приведены результаты анализа люминофора, обработанного персульфатом калия и тиосульфатом натрия.

Из данных табл. 9 следует, что в результате воздействия на люминофор раствора персульфата калия достаточно эффективно снижается содержание свободной Hg – до 2,2%, т.е. примерно также как при обработке люминофора раствором полисульфида натрия. В основном Hg присутствует в виде соединения, термоформа которого соответствует интервалу 140–240°C (это соединение идентифицировано выше как адсорбированная ртуть), и соеди-

нения, температура возгонки которого выше 480°C. Идентификация этой формы ртути в настоящей работе не проводилась. При обработке люминофора раствором тиосульфата натрия термоформа, соответствующая сульфиду ртути (240–340°C), является преобладающей (доля выхода 49,1%). Вместе с тем в этом случае достаточно велико содержание свободной ртути, не преобразованной в соединения (20,5%), что снижает значимость препарата как средства демеркуризации. Эффективность демеркуризационного препарата «Э-2000» определялась при непосредственном его воздействии на металлическую ртуть. Результаты химического анализа продуктов демеркуризации показали, что в этом случае ртуть преобразуется, главным образом, в сульфидную форму (до 70%).

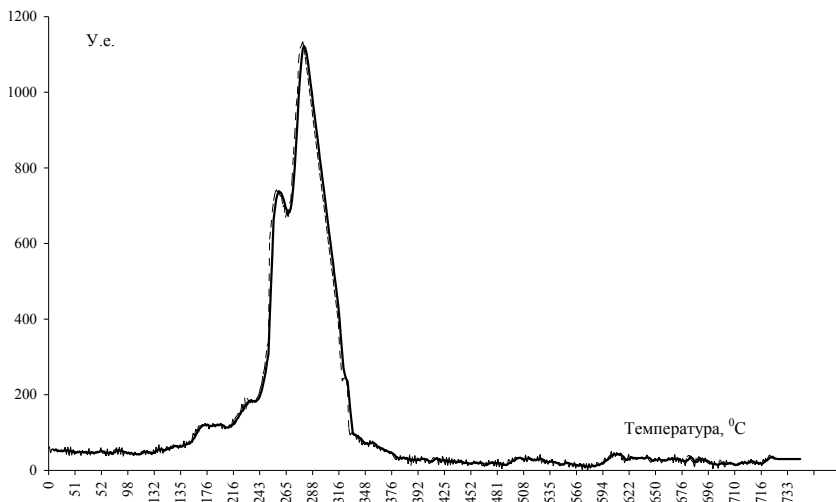


Рис. 9. Кинетика выхода ртути (условные единицы) при нагревании из синтетического образца, содержащего сульфид ртути

Таблица 9

**Влияние персульфата калия и тиосульфата натрия на процентное содержание различных форм ртути в люминофоре**

Наименование препарата, использованного для демеркуризации	Интервал температур, °С				
	140	140-240	240-340	340-480	480
Люминофор, не обработанный демеркуризатором	89,6	5,3	1,6	2,4	1,0
10 %-ный р-р $K_2S_2O_8$	2,2	60,1	3,0	-	42,8
10 %-ный р-р $Na_2S_2O_3$	20,5	8,9	49,1	8,7	12,8

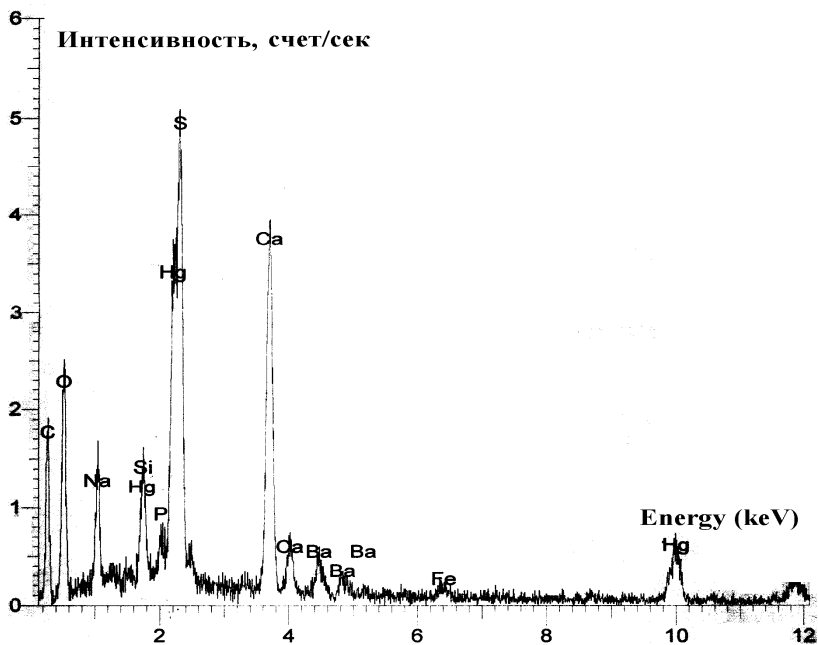


Рис. 10. Рентгеновский энергодисперсионный спектр люминофора, обработанного 30% раствором сульфида натрия

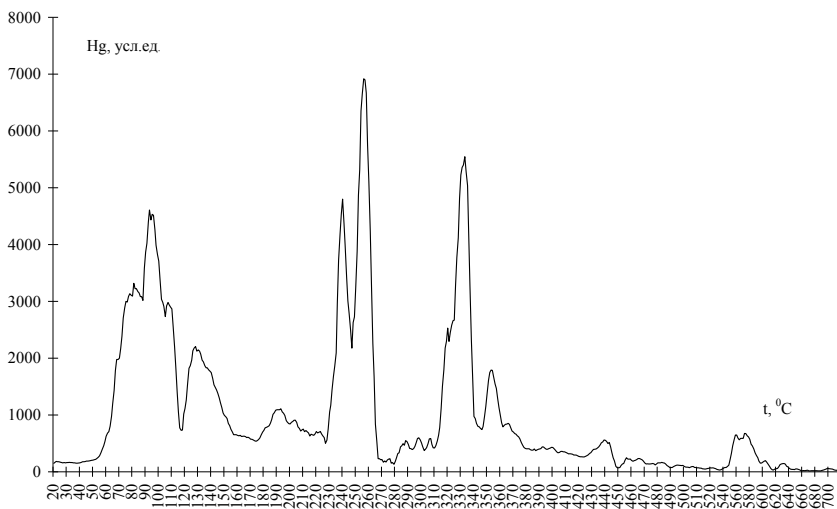


Рис. 11. Кинетика выхода ртути (в условных единицах) при нагревании из люминофора, обработанного 30%-ным раствором сульфида натрия



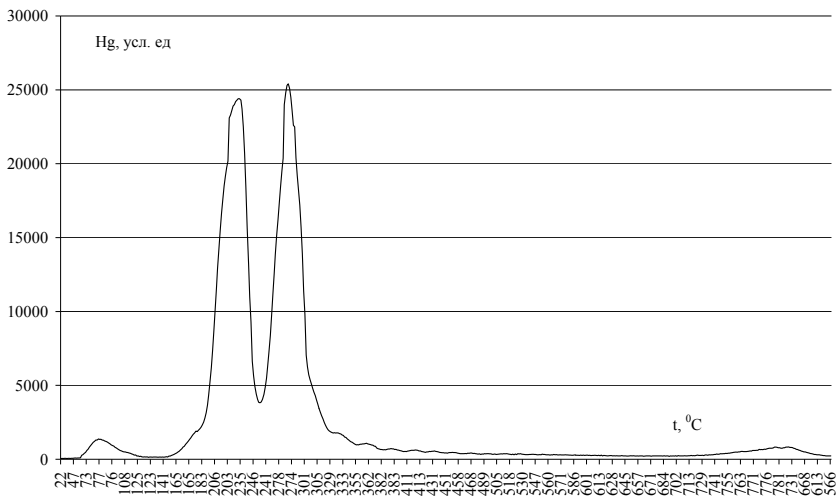


Рис. 12. Кинетика выхода ртути (в условных единицах) при нагревании из продуктов взаимодействия препарата и ртути.

Согласно данным термического анализа (рис. 12), продуктам демеркуризации, образующимся при обработке ртути указанным препаратом, соответствуют термоформы с температурными интервалами 240–340°C и 140–240°C. Соединение с термоформой в интервале 240–340°C выше идентифицировано как сульфид ртути. Термоформа, соответствующая интервалу 140–240°C, указывает на наличие ртути, адсорбированной серой; со временем это образование переходит в сульфид ртути.

Таким образом, при обработке загрязненных ртутью материалов растворами сульфида натрия основной формой ее в продуктах демеркуризации является ртуть, адсорбированная сульфид-ионом. При этом остается значительное количество свободной ртути (от 13,8 до 66,8%). Воздействие полисульфида натрия приводит к образованию сульфида ртути; вместе с тем в продуктах демеркуризации превагирует образование, идентифицированное как ртуть, адсорбированная сульфид-ионом. В этом случае содержания свободной ртути снижается до 2,2%. Адсорбированная сульфид-ионом ртуть со временем (6–12 месяцев) преобразуется в сульфид ртути. Наряду с этим при длительном хранении продуктов демеркуризации, образованных в результате воздействия препаратов на основе сульфида и полисульфида натрия, имеет место и обратный процесс: выделение свободной ртути. Препарат на основе персульфата калия сравним по эффективности с полисульфидом натрия, который снижает содержание свободной ртути до 2,2%. Однако сульфидная форма ртути (наиболее устойчивое соединение) в продуктах демеркуризации отсутствует. Значительное содержание свободной ртути в продуктах демеркуризации, образованных при воздействии тиосульфида натрия, не позволяет считать этот препарат эффективным демеркуризатором.

ром. Наиболее эффективным демеркуризационным препаратом из исследованных в настоящей работе препаратов является «Э-2000», при воздействии которого на металлическую ртуть образуется, главным образом, сульфид ртути (70%) и «предсульфидная» форма, т. е. ртуть, химически адсорбированная серой, со временем преобразующаяся в сульфид ртути.

Интересно отметить, что исследование люминесцентных ламп, пролежавших 5 лет, не будучи включенными в электросеть, не обнаруживали связанной на поверхности стеклянной колбы ртути [23]. Специфическое поведение ртути в работающей лампе авторы цитируемой работы объясняют электрохимическими эффектами и наличием плазмы «ртуть/разряженный газ» в колбе. Они также установили, что количество ртути, фиксируемое поверхностью колбы работающей лампы, эмпирически описывается как функция времени (продолжительности) работы последней и количества люминофора на стекле (оно было приблизительно пропорционально квадратному корню времени и обратно пропорционально весу люминофора), причем установлено, что ртуть физически не может реагировать непосредственно со стеклом, которое находится под частицей люминофора.

Таким образом, исследования, выполненные в последние годы за рубежом и в России, свидетельствуют о том, что не менее 95–97% ртути в лампе, бывшей в эксплуатации, связано с люминофором и лишь 3–5% со стеклом и прочими ее деталями. Люминофор, покрывающий внутреннюю поверхность стеклянной трубки, в работающей лампе является своеобразным барьером для ртути и постоянно депонирует ее в разнообразных формах, определенная часть из которых в конечном счете достаточно прочно связывается его веществом. В любом случае люминофорный порошок в отработанных лампах является опасным материалом, в котором содержания ртути много выше, чем в люминофоре новых ламп. В сущности, указанные исследования и послужили теоретической базой для разработки принципиально новых способов обезвреживания люминесцентных ламп, основанных на использовании «сухих» и «холодных» технологических процессов, главной целью которых является максимально полное выделение из лампы основного носителя ртути – люминофора (с примесью тонкой стеклянной пыли). Очень часто из-за относительно невысокого содержания ртути в люминофоре и особенно при небольших его объемах получение из него ртути термическим методом (в том числе, вакуумной дистилляцией) достаточно затруднено и экономически не всегда целесообразно. Именно поэтому во многих странах в последнее время активно внедряются способы стабилизации и солидификации галофосфатного люминофора, позволяющих прочно связать ртуть с его матрицей и дающих возможность его последующего размещения на свалках.

Подход, основанный на ведущей роли люминофора в аккумуляровании ртути, присутствующей в отслужившей свой срок лампе, использован специалистами ООО «НПП «Экотром», которые разработали вибропневматическую технологию переработки люминесцентных ламп [7, 10–12]. Эта технология, реализованная в демеркуризационной установке «Экотром-2», базируется на «холодных и сухих» процессах дробления и сепарации изделий в системе с пониженным давлением, что позволяет разделить лампы на три компонента: металлические цоколи, стеклянную смесь (стеклобой), ртутьсодержащий люминофор.

Вибропневматическая демеркуризационная установка «Экотром-2» состоит из двух основных блоков: 1) устройства разделения ламп (оно включает узел загрузки, пневмовибрационный сепаратор с дробилкой, циклон) и

2) многоступенчатой системы очистки отходящих газов, включающей рукавный фильтр, адсорберы, газодувку с компрессором (рис. 13).

Компрессор создает в демеркуризационной установке разрежение (от 5-8 КПа в зоне загрузки ламп до 19-23 КПа перед газодувкой), что практически исключает вероятность пылегазовых выбросов в производственное помещение. Как уже сказано выше, установка оборудована последовательной системой очистки пылегазовых выбросов, включающей циклон (эффективность очистки 95-97%), рукавные фильтры (99,96%), рабочий адсорбер (с активированным углем), что позволяет практически полностью улавливать пыль люминофора и снизить содержание ртути в отходящих газах до уровня менее 0,0001 мг/м<sup>3</sup>.

Переработка люминесцентных ламп на демеркуризационной установке «Экотром-2» осуществляется следующим образом. Лампы, поступающие на предприятие в специальных контейнерах, на которые имеется санитарно-эпидемиологическое заключение, направляются в узел загрузки. Затем они через ускорительную трубку за счет существующего в установке высокого разряжения непрерывно подаются в сепаратор, где измельчаются до крупности стекла менее 8 мм. Цоколи отделяются от стекла на вибрирующей решетке и поступают в специальный сборник (технологический контейнер), который после заполнения направляется в демеркуризационно-отжиговую электрическую печь, где цоколи демеркуризируются. Отходящие газы указанной печи отводятся в существующую систему очистки. Отделение от стекла люминофора производится за счет его выдувания в противоточно движущейся системе «стеклобой-воздух» в условиях вибрации. Очищенный от люминофора стеклобой поступает в бункер-накопитель. Основная масса люминофора (95-97%) улавливается в циклоне и аккумулируется в удобных для транспортировки металлических емкостях-бочках с полиэтиленовым мешком-вкладышем и герметичной крышкой. Не уловленный в циклоне люминофор осаждается в приемнике рукавного фильтра и затем упаковывается в такие же емкости. Ртутьсодержащий люминофор подлежит отправке на специализированные предприятия (для получения металлической ртути); очищенные от ртути стеклобой и цоколи могут использоваться как вторичное сырье. Следует отметить, что в ООО «НПП «Экотром» разработана также технология получения цементно-люминофорных блоков с последующей их упаковкой в специальную тару из полиэтилена. По заключению НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина, расфасовка цементно-люминофорных блоков в полиэтиленовые мешки является эффективным способом предупреждения поступления ртути в среду обитания, а указанные блоки при необходимости могут транспортироваться на значительные расстояния.

Балансовые расчеты показывают, что установка «Экотром-2» позволяет вместе с люминофором извлекать из каждой лампы не менее 95-97% содержащейся в ней ртути. Подавляющая часть оставшейся ртути аккумулируется в рабочем адсорбере на активированном угле, импрегнированного серой. При ежегодной переработке на установке 6 млн. ламп образуется около 90 т содержащего ртуть (2600-3000 г/т) люминофора, около 25 т металлических цоколей и примерно 1385 т стеклобоя (в которых содержание ртути существенно ниже 2,1 мг/кг), а также 0,5 т отработанного активированного угля (он содержит 14-15 кг ртути). Общий объем отходящих в атмосферу газов составляет 360 м<sup>3</sup>/час; температура газов 10-30оС, содержание ртути в них менее 0,0003 мг/м<sup>3</sup>. При работе установки «Экотром-2» в режиме 5000 час/год масса ртути, ежегодно поступающей с отходящими газами в атмо-

сферу, не превышает 0,54 г, что существенно ниже расчетных выбросов, полученных для термических установок демеркуризации (как известно, при сжигании только лишь 1 т каменного угля в топке городской ТЭЦ в атмосферу поступает 0,05-0,1 г ртути).

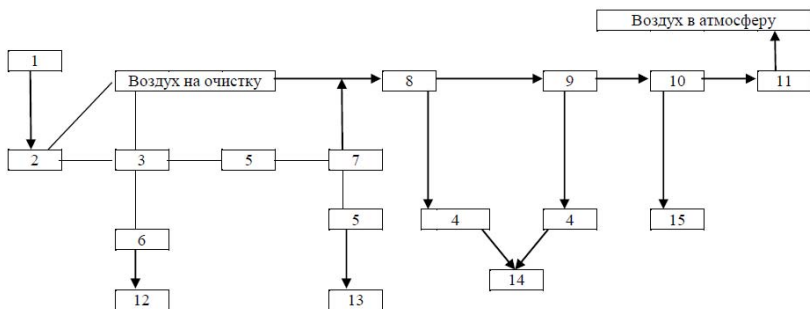


Рис. 13. Общая схема переработки ламп на установке «Экотром-2».

- 1 – узел загрузки ламп, 2 – механизм измельчения ламп, 3 – пневмовибрационный сепаратор, 4 – сборник люминофора, 5 – сборник цоколей, 6 – сборник стеклобоя, 7 – демеркуризационно-отжиговая шахтная печь, 8 – циклон, 9 – рукавный фильтр, 10 – адсорбер, 11 – газодувка (компрессор), 12 – стеклобой (на утилизацию), 13 – цоколи (на утилизацию), 14 – ртутьсодержащий люминофор (на переработку), 15 – ртутьсодержащий сорбент (на переработку)

Таблица 10

**Основные характеристики установки «Экотром-2» \***

Наименование	Показатели
Производительность	
Утилизируемые лампы	1200 шт./час
Стеклоянная масса (стеклобой)	250–280 кг/час
Ртутьсодержащий люминофор	15–18 кг/час
Металлические цоколи	4–5 кг/час
Энергопотребление	
Общее потребление энергии	11 кВт/час
в том числе:	
газодувка	7,5 кВт/час
дробилка	2 кВт/час
вибратор	1,1 кВт/час
прочие	0,4 кВт/час
Расход основных материалов	
Сжатый воздух (для продувки рукавных фильтров)	0,3 м <sup>3</sup> /час
Активированный уголь (для загрузки адсорберов)	0,5 т/год
Сера (для импрегнирования активированного угля и текущей демеркуризацией)	25 кг/год
Вода (для санитарной обработки помещений и оборудования)	20 л/смена

\* Размещается установка на площади примерно в 20 м<sup>2</sup>.

Установка «Экотром-2» отличается высокой производительностью и низкой удельной (в расчете на одну утилизируемую стандартную трубчатую люминесцентную лампу низкого давления) энергоемкостью. Так, при практически равном с термоустановками общем потреблении электроэнергии установка «Экотром-2» намного производительнее (производительность термоустановок обычно составляет 180-200 ламп в час, установки «Экотром-2» – достигает 1200 ламп в час). Удельные расходы воды и сжатого воздуха, необходимые для обслуживания установки «Экотром-2», также существенно (почти на два порядка) меньше. В табл. 10 приводятся основные характеристики вибропневматической демеркуризационной установки «Экотром-2», типичные для ее стандартного режима работы (5000 часов в год, 6 млн. перерабатываемых люминесцентных ламп).

Из-за относительно невысокого содержания ртути в люминофоре получение из него ртути термическим методом достаточно затруднено и не всегда целесообразно. В ООО «НПП «Экотром» разработаны технические условия «Продукт минерализации люминофора», которые распространяются на продукт, образующийся в результате обезвреживания и минерализации люминофора на завершающей стадии производственного цикла переработки всех типов ртутных ламп на указанных установках. Обезвреживание (стабилизация) смеси ртутьсодержащего люминофора и стеклянной пыли осуществляется путём ее обработки раствором демеркуризационного препарата, содержащего структурообразующую добавку минерального вяжущего вещества. При этом, как указывают разработчики данного способа, ртуть преобразуется в «практически нерастворимое соединение – сульфид ртути – отвечающее её природной форме». Кроме того, отмечают авторы, при добавлении минерального вяжущего вещества в систему «галофосфат кальция (люминофор) – демеркуризатор» образуется изоморфное соединение, в кристаллическую структуру которого входят ионы кальция и ртути, что обеспечивает дополнительную стабильность конечного продукта преобразования ртути. Данная стабилизация позволяет перевести ртутьсодержащий люминофор в группу отходов IV класса опасности, что, в принципе, определяет возможность последующего размещения полученного минерального продукта на промышленных полигонах, а также обеспечивает его безопасную доставку на спецпредприятия для получения из него ртути. Обработка люминофора демеркуризационным раствором производится непосредственно в технологическом контейнере с использованием для смешения вибратора или в специализированном смесителе. Стабилизированный продукт представляет собой твердую массу серого цвета, не растворимую в воде, не горюч и не взрывоопасен. Согласно заключению ГУ НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина РАМН, сделанном на основании проведенных исследований по теме «Определение класса опасности стеклобоя ртутьсодержащих ламп после обработки раствором Э-2000» (отчет №15/169-07) и «Экспериментальное санитарно-гигиеническое обоснование класса опасности отходов обработки ртутьсодержащих ламп» (отчет №15/70-04) минерализованная смесь относится к отходам IV классу опасности (малоопасные отходы), а разработанная технология может эффективно использоваться на территории Российской Федерации. Авторы разработки также рекомендуют указанный демеркуризационный препарат для обезвреживания боя горелок ламп ДРЛ, сорбента и других отходов с высоким содержанием ртути.

Безусловно, в основу разработки новых и совершенствования существующих технологий переработки использованных («перегоревших») люминесцентных ламп должен быть положен факт накопления (депонирования) подавляющего количества присутствующей в них ртути в люминофоре с последующим его обезвреживанием.

## Литература

1. *Айзенберг Ю.Б.* Современные проблемы энергоэффективного освещения // Энергосбережение, 2009, № 1.
2. Аналитическая химия ртути. – М.: Наука, 1974. – 321 с.
3. *Валох А.А., Колесов А.А., Чернова А.Е.* Определение термостойкости ртути методом атомной абсорбции // Геохимические исследования городских агломераций. – М.: ИМГРЭ, 1998, с. 126–132.
4. Источники света. Каталог светотехнических изделий. – М.: Московский «Дом Света», 2003. – 124 с.
5. *Косорукова Н.В., Янин Е.П.* Утилизация отходов ртутьсодержащих изделий: состояние и проблемы // Светотехника, 2002, № 3, с. 25–29.
6. *Макарченко Г.В., Косорукова Н.В., Валох А.А.* Демеркуризация объектов городской среды // Эколого-геохимические проблемы ртути. – М.: ИМГРЭ, 2000, с. 153–160.
7. *Макарченко Г.В., Тимошин В.Н., Тияжков К.М., Янин Е.П.* «Экотром-2У» – новый технологический мини-комплекс по обезвреживанию и утилизации люминесцентных ламп // Экологические системы и приборы, 2012, № 7, с. 8–12.
8. *Рохлин Г.Г.* Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 720 с.
9. Справочная книга по светотехнике. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 528 с.
10. *Тимошин В.Н., Макарченко Г.В.* Установка «ЭКОТРОМ-2» – эффективное решение проблем утилизации ртутных ламп // Экологические системы и приборы, 2006, № 3, с. 16–19.
11. *Тимошин В.Н., Тияжков К.М., Макарченко Г.В., Кочуров А.В., Янин Е.П.* Пневмовибрационные способы утилизации энергосберегающих люминесцентных ламп // Экономика природопользования, 2011, № 6, с. 67–71.
12. *Тимошин В.Н., Макарченко Г.В., Янин Е.П.* Вибропневматическая установка «Экотром-2» – эффективное решение проблем утилизации ртутных ламп // 4-й Междунар. конгресс по управлению отходами. ВэйстТэк-2005. Сб. докл. – М.: ЗАО «Фирма СИБИКО Интернэшнл», 2005, с. 173.
13. *Федоров В.В.* Люминесцентные лампы. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 128 с.
14. *Янин Е.П.* Экологические аспекты производства и использования ртутных ламп. – М.: Диалог-МГУ, 1997. – 41 с.
15. *Янин Е.П.* Ртутные лампы как источник загрязнения окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 2005. – 28 с.
16. *Янин Е.П.* Состояние и проблемы утилизации использованных ртутных ламп в Южном федеральном округе России // Ресурсосберегающие технологии, 2007, № 18, с. 9–14.
17. *Янин Е.П.* Система обращения с отработанными ртутными лампами в городе Москве // Ресурсосберегающие технологии, 2009, № 5, с. 3–7.
18. *Янин Е.П.* Ртутные лампы: опасность для окружающей среды // Экология производства, 2010, № 2, с. 53–55.

19. Янин Е.П. Состояние и проблемы утилизации ртутных ламп в России // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2010, № 2, с. 25–84.
20. Янин Е.П., Бессонов В.В. Использованные ртутные лампы как потенциальный источник загрязнения среды обитания // Ресурсосберегающие технологии, 2007, № 18, с. 3–9.
21. Chang T.-C., Wang S.-F., You S.-J., Cheng A. Characterization of halophosphate phosphor powders recovered from the spent fluorescent lamps // J. Environ. Eng. Manage., 2007, 17(6), p. 435–439.
22. Dang T.A., Frisk T.A., Grossman M.W., Peters C.H. Identification of mercury reaction sites in fluorescent lamps // J. Electrochem. Soc., 1999, 146 (10), p. 3896–3902.
23. Doughty D.A., Wilson R.H., Thaler E.G. Mercury-glass interaction in fluorescent lamps // J. Electrochem. Soc., 1995, 142, № 10, p. 3542–5351.
24. IMERC Fact Sheet. Mercury Use in Lighting. Last Update: August 2008 // <http://www.newmoa.org/prevention/mercury/imerc/factsheets/lighting.pdf>.
25. Jang M., Hong S. M., Park J. K. Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps // Waste Manage, 2005, 25, p. 5–14.
26. Mercury emissions from the disposal of fluorescent lamps. Final report. Office of Solid Waste, U.S. Environmental Protection Agency // <http://www.epa.gov/osw/hazard/wastetypes/universal/merc-emi/merc-pgs/merc-rpt.pdf>.
27. Morturd J. Fluorescent lamp collection and separation method and apparatus // J. Clean. Prod., 1997, 5(3), p. 231–231.
28. Raposo C., Windmüller C.C., Durão Junior W.A. Mercury speciation in fluorescent lamps by thermal release analysis // Waste Management, 2003, v. 23, p. 879–886.
29. Thaler E.G., Wilson R.H., Doughty D.A., Beers W.W. Measurement of mercury bound in the glass envelope during operation of fluorescent lamps // J. Electrochem. Soc., 1995, 142 (6), p. 1968–1970.