

Макарченко Г.В., Тимошин В.Н., Тиняков 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.

В России использованные ртутные лампы включены в «Федеральный классификационный каталог отходов» как отходы, обладающие 1-м классом опасности для окружающей среды и подлежащие обезвреживанию (переработке) с использованием соответствующих технологий. 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». Согласно указанному Постановлению, обезвреживание отработанных ртутных ламп должно производиться специализированными организациями, осуществляющими их переработку методами, обеспечивающими выполнение санитарно-гигиенических, экологических и иных требований. Это обуславливает необходимость разработки и практического внедрения экономически эффективных и экологически безопасных технологий и соответствующих установок по переработке отработанных энергосберегающих ртутных ламп как в крупных промышленно-селитебных центрах, так и в малонаселенных районах нашей страны.

В свое время в ООО «НПП «ЭКОТРОМ» был разработан и внедрен в практику так называемый «холодный и сухой» пневмовибрационный метод переработки ртутьсодержащих ламп, который вначале реализован в установке «Экотром-2» [1, 2]. Позднее, на основе указанного метода, были разработаны различные модификации указанной установки, позволяющие перерабатывать практически все типы ныне используемых люминесцентных ламп (ЛЛ) [3]. Принцип действия установок серии «Экотром-2» основан на разделении ламп на основные составляющие: стекло, металлические цоколи и люминофор, который в отработанных ртутных лампах является основным концентратом и носителем ртути [4]. Очищенные от ртути стекломой и металлические цоколи используются в качестве вторичного сырья. Люминофор также может быть сырьем для получения ртути на специализированных предприятиях.

Согласно Федеральному закону РФ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», с 1 января 2011 г. на территории страны к обороту не допускаются лампы накаливания (ЛН) мощностью 100 Вт и более; с 1 января 2011 г. запрещается размещение заказов на поставки ЛН для государственных или муниципальных нужд, с 1 января 2013 г. может быть введен запрет на оборот на территории России ЛН мощностью 75 Вт и более, а с 1 января 2014 г. – ЛН мощностью 25 Вт и более. Отсюда следует, что в самые ближайшие годы в нашей стране широкое применение получают компактные люминесцентные лампы (КЛЛ), требующие особого подхода к их обезвреживанию, поскольку как совместная (в едином потоке с другими видами ртутных ламп), так и отдельная (например, известными термическими и гидрометаллургическими методами) переработка их не всегда экологически оправдана и, в большинстве случаев, экономически неэффективна.

Во многом это обусловлено тем, что содержание ртути в КЛЛ обычно не превышает 3–5 мг, т. е. существенно ниже, чем в стандартных линейных (трубчатых) ЛЛ (на порядок) и в ртутных лампах высокого и сверхвысокого давления (на один-два порядка) [5, 6]. Малый диаметр трубок КЛЛ и кривизна поверхности не позволяют применить к ним традиционные способы измельчения и выдувания люминофора из измельченных движущихся, вращающихся, вибрирующих масс стекла, как это происходит, например, в установках типа «Экотром-2». Тонкое измельчение ламп приводит к невозможности разделения люминофора и стеклянной пыли.

Указанную выше проблему позволяет эффективно разрешить универсальный технологический мини-комплекс «Экотром-2У» (ТМК «Экотром-2У»), состоящий из аппарата измельчения ЛЛ и нейтрализации (сульфидирования) ртути, измельчителя КЛЛ, сборников-накопителей сырья, узла очистки технологического воздуха (рис. 1). Площадь основного рабочего помещения, необходимого для размещения мини-комплекса, составляет 20–25 м².



Рис. 1. Общий вид мини-комплекса «Экотром-2У».

1 – аппарат измельчения ЛЛ и нейтрализации ртути; 2 – узел очистки технологического воздуха; 3 – сборники-накопители сырья; 4 – измельчитель КЛЛ

ТМК «Экотром-2У» способен перерабатывать (обезвреживать) КЛЛ и их бой, другие разновидности ЛЛ и их бой, горелки ртутных ламп высокого давления, колбы и капилляры ртутных термометров, из которых удалена металлическая ртуть, а также образующиеся

в ходе эксплуатации мини-комплекса различные материалы: сорбенты, пыль аспирационных установок, пыль, собранную при уборке рабочих помещений, оборудования и тары (табл. 1).

Таблица 1. Среднесменная производительность МТК «Экотром-2У» *

Наименование сырья, материалов	шт/час
Компактные люминесцентные лампы	200
Линейные трубчатые люминесцентные лампы	500
U-образные и фигурные люминесцентные лампы	300
Бой ламп и приборов, сыпучие и измельченные материалы, пыль, кг/час	30
Сорбенты, кг/час	20

* Среднесменная производительность учитывает все промежуточные технологические операции: подготовку сырья, смену контейнеров, продувку, удаление готовых продуктов и т. д. Общее количество рабочих часов в году – 1500.

В основу технологии обезвреживания ламп и других материалов положен способ, сущность которого состоит в том, что непосредственно в аппарате измельчения на поверхность измельчаемых ламп (и других сыпучих материалов) распылением, смачиванием или капельным путем наносится (из расчета 4 мл/лампа) тонкий слой демеркуризационного препарата Э-2000Т (Рисол), при разложении химических соединений которого выделяется высокоактивная сера, сероводород, оксид кальция и тепло, интенсифицирующее дальнейшее разложение препарата и сушку смоченных поверхностей, что в конечном итоге приводит к образованию на смоченной поверхности сульфида ртути. Обезвреженная измельченная стекломасса и другие материалы затем включаются в цементную матрицу, из которой получают искусственный щебень. Алюминиевые цоколи выходят без посторонних включений, готовыми к непосредственной сдаче в пункты приема лома цветных металлов.

Аппарат измельчения ламп и нейтрализации ртути предназначен для измельчения линейных (трубчатых) ЛЛ и стабилизации содержащиеся в них ртути в сульфидной форме (1 – см. рис. 1). Поступающие в аппарат через загрузочную трубу и получающие при этом ускорение лампы на выходе из трубы измельчаются вращающимися со скоростью 3000 об/мин ударными элементами до фракции 0,1–4 мм. Одновременно из емкости в воронку через открытый кран и капельное устройство поступает подогретый до температуры 40–80⁰С раствор демеркуризационного препарата Рисол, основу которого составляют полисульфид и тиосульфат кальция. На дне воронки размещен пористый гидрофобный материал, препятствующий свободному поступлению демеркуризационного раствора через отверстия в воронке в аппарат. Определенное количество раствора (1–3 мл) всегда находится на поверхности гидрофобного материала, просасываясь через него при вводе в трубу очередной лампы за счет увеличивающегося при этом разряжения в аппарате. Возникающие при вращении ударных элементов горизонтальные и вертикальные вихри интенсивно перемешивают измельчаемые части ламп с поступающим горячим раствором и выбрасывают смесь через сепарационную решетку в сборник обезвреженных отходов (3 – рис. 1), в котором они продолжают находиться в интенсивном вращательном движении. Влажный теплый воздух поднимается из сборника отходов и поступает через конус, вва-

ренный в сепарационную решетку, в зону повышенного разряжения в центральной части вращающихся ударных элементов, перемещаясь затем к их периферии за счет центробежных сил (этот процесс осуществляется непрерывно). Металлические цоколи ламп, не имея возможности пройти через сепарационную решетку, освобождаются ударными элементами от электроизоляционных материалов и мастики и накапливаются в обечайке аппарата. На поверхности измельченного стекла и других материалов в вихревых потоках влажного теплого воздуха происходят процессы разложения полисульфида и тиосульфата кальция с высвобождением высокоактивной дисперсной серы, а так же высокоактивного в этих условиях сероводорода (до 2 мг/м³), которые, взаимодействуя с сорбированной люминофором ртутью, находящейся в атомарном состоянии, переводят ее в сульфидную форму, а за счет тепла, высвобождаемого в процессе гидролиза полисульфидов в паровой фазе, все находящиеся в сборнике обезвреживаемые отходы высушиваются.

С целью предотвращения конденсации водяного пара на поверхности обезвреживаемых материалов каждые 1–2 мин. осуществляется проветривание аппарата и удаление влажного воздуха. Это происходит в момент вывода из аппарата обезвреженных цоколей (за 1–2 мин. работы в аппарате накаливается до 20–40 цоколей), что производится путем открытия выпускающей заслонки, расположенной на боковой поверхности обечайки аппарата над сепарационной решеткой. Цоколи за счет центробежной силы выбрасываются из аппарата в специальный приемник, а воздух помещения через открытую заслонку засасывается в аппарат и, проходя по загрузочной трубе, поступает в узел газоочистки (2 – рис. 1). Здесь воздух очищается в циклоне от частиц крупнее 5 мкм, а затем поступает в адсорбер, где наряду с химической очисткой от паров ртути из него удаляются частицы размером менее 5 мкм. В качестве сорбента используются активированные угли марок АГ-5 (мелкая фракция) и АГ-3. В процессе работы уголь сорбирует содержащиеся в технологическом воздухе дисперсную серу и сероводород и тем самым самомодифицируется, т. е. эффективность адсорбера в процессе работы возрастает. Собранная в расположенном под аппаратом сборнике-накопителе (3 – рис. 1) измельченная и стабилизированная стекломасса при помощи пневмотранспорта перегружается в сборник большего размера, из которого затем используется для солидификации (включения в цементную матрицу). Очистка воздуха при перегрузке сырья осуществляется теми же аппаратами узла очистки технологического воздуха.

Измельчитель КЛЛ предназначен для измельчения ламп и горелок всех типов (кроме прямых) и стабилизации ртути в сульфидной форме (4 – рис. 1, рис. 2). Измельчитель КЛЛ состоит из фланцевого электродвигателя (4.1 – см. рис. 2), сочлененного при помощи болтового соединения с ответным фланцем трубы (4.2) диаметром 129 мм и длиной 600 мм. На вал электродвигателя насажена ступица, выходящая в трубное пространство. Диаметр ступицы позволяет ей вращаться в трубе. По диаметру ступицы перпендикулярно к плоскости ее вращения при помощи резьбовых соединений установлены пальцы (4.5), выполненные из высокоуглеродной стали. На поверхность ступицы при помощи сварки нанесены выпуклые борозды, предназначенные для первичного разрушения стекла ламп и отбрасывания его на пальцы для более тонкого измельчения. Для выпуска измельченного стекла в трубу перпендикулярно вварен патрубок (4.3), второй конец которого приварен к крышке (4.4), устанавливаемой на сборник-накопитель (3). Измельчитель размещается на сборнике-накопителе конической формы емкостью 40–60 л или на обечайке аппарата из-

мельчения ламп и стабилизации ртути и подключается к узлу очистки технологического воздуха.

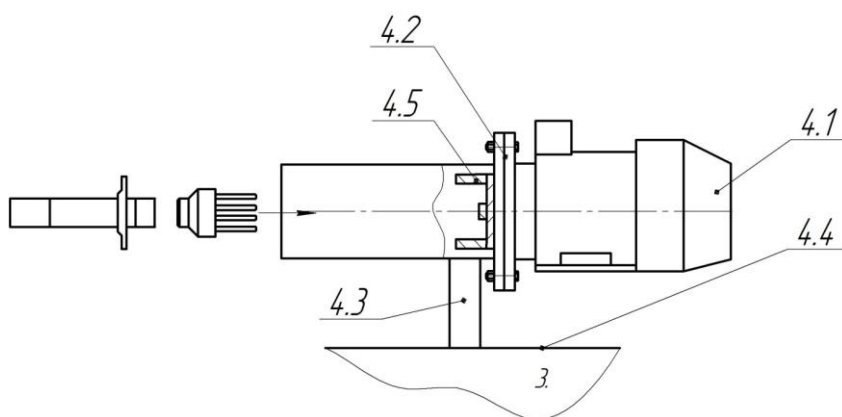


Рис. 2. Схема устройства измельчителя компактных люминесцентных ламп (описание в тексте).

Диаметр загрузочной трубы измельчителя КЛЛ – 114 мм, что позволяет измельчать практически все U-образные и фигурные лампы, КЛЛ и горелки. Лампы вводятся в измельчитель поштучно, горелки предварительно освобождаются от арматуры; КЛЛ подаются в

измельчитель при помощи специального приспособления, позволяющего защитить от разрушения их цоколь, который после измельчения стеклянной части лампы изымается для утилизации. Перед вводом лампы в измельчитель она окунается в раствор демеркуризационного препарата Рисол, разбавленного (в соотношении 1:1) водой ($\text{pH} \geq 9$). В целях интенсификации процесса и снижения расхода демеркуризационного препарата, он должен быть нагрет в расходной емкости до $40\text{--}60^\circ\text{C}$, желательнее так же доводить до температуры $30\text{--}40^\circ\text{C}$ поверхность сборника-накопителя. Одновременно протекающие процессы измельчения смоченных ламп, выделения высокодисперсной серы в наиболее реакционно-способной форме и сероводорода, наличие теплой влажной среды приводят к преобразованию ртути, содержащейся в лампах, в сульфидную форму. Бой ламп и горелок (в зависимости от размеров) обезвреживается в измельчителе или (при наличии цоколей) в аппарате стабилизации (сульфидирования). При наполнении сборника-накопителя примерно на $2/3$ измельчитель снимается, в сборник добавляются (при наличии) сыпучие материалы: пыли аспирационной системы, пыль и сметы, собранные при уборке территории предприятия, помещений цеха, оборудования, тары, сорбенты, загрязненные ртутью земли, песок ($\text{Hg} < 0,026\%$), нейтрализованная в сборниках под циклоном люминофоростеклянная пыль. Все сыпучие материалы предварительно, в местах сбора, должны быть обработаны раствором демеркуризационного препарата Рисол и при загрузке в сборник находиться во влажном состоянии. Раствор при обработке сыпучих материалов должен иметь температуру $40\text{--}60^\circ\text{C}$. Если не предполагается немедленная засыпка обработанных материалов в сборник для солидификации (отверждения), то они должны быть помещены в плотные полиэтиленовые мешки, которые размещаются в теплом ($> 20^\circ\text{C}$) месте (для завершения процессов нейтрализации).

Составной частью рассматриваемого комплекса является узел очистки технологического воздуха (2 – рис. 1), который предназначен для очистки воздуха от взвешенных частиц (с эффективностью для частиц $> 0,5$ мкм – 99,99 %) и от паров ртути (с эффективностью 95–99% при начальной концентрации ртути не более $0,05$ мг/м³ и относительной влажности отходящего воздуха $\leq 95\%$). Он включает циклон и адсорбер. Для сбора уловленной пыли стекла и люминофора под циклоном (эффективность 95% при сопротивлении 6 кПа) размещается бутылка (объем 20 л), в которую предварительно заливается 5 л

раствора демеркуризационного препарата Рисол, разбавленного водой ($\text{pH} \geq 9$) в соотношении (препарат : вода) 1:1. Поскольку воздух, удаляемый из аппарата измельчения ламп и стабилизации ртути, содержит последнюю в небольших количествах ($< 0,05 \text{ мг/м}^3$), что в 10–20 раз ниже ее концентрации в воздухе, выходящем из аппаратов измельчения ламп или отдувки люминофора, в качестве второй «тонкой» ступени очистки воздуха от аэрозолей используется адсорбер (эффективность очистки от ртути $> 95\%$). Использование адсорбера диктуется так же тем, что из аппарата удаляется воздух с возможной относительной влажностью до 90% и более, что затрудняет использование волокнистых, рукавных, тканевых и т. п. фильтров. Адсорбер снаряжается простым активированным углем марок АГ-3 и АГ-5, который импрегнируется серой и сероводородом, поступающими в адсорбер совместно с парами ртути в процессе работы. В первых (по ходу воздуха) слоях адсорбера можно использовать отработанные угли серного и йодного производств, другие сорбенты или более дешевые угли с размером частиц $< 3 \text{ мм}$. Сопротивление адсорбера в случае применения мелких фракций угля высокое (до 10 кПа); скорость фильтрации 0,4 м/сек; высота слоя до 900 мм; объем очищаемого воздуха $< 100 \text{ м}^3/\text{час}$; единовременный объем засыпки адсорбера $\approx 40 \text{ кг}$. Очищенный от ртути (до уровня ниже ПДК населенных мест или рабочей зоны) технологический воздух удаляется в аспирационную систему цеха или атмосферу через тягодутьевое устройство, снабженное шумоглушителем.

Содержание сульфида ртути в обезвреженном (стабилизированном) стеклобое не превышает 0,01% (ртути – не более 0,026%). Исследования, выполненные ГУ НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина, показали, что обезвреженная масса стеклобоя ЛЛ соответствует IV классу опасности. Обезвреженная стекломасса, выгружаемая из установки, не пылит. Содержание паров ртути на высоте 0,5 м над выгружаемым материалом не превышает $0,003 \text{ мг/м}^3$ (обычно $0,001 \text{ мг/м}^3$), т. е. находится на уровне меньше среднесменной ПДК и практически не отличается от фона. Важно отметить, что получаемое при высоких скоростях дробления измельченное в достаточной степени стекло включается в цементную матрицу без добавления песка. В процессе высыхания и включения стекломассы в цементную матрицу выделение паров ртути из готовых материалов (искусственного щебня) прекращается.

Стабилизированные материалы либо накапливаются для последующего включения в цементную матрицу в емкостях, либо подвергаются включению в нее непосредственно в сборниках. При получении стеклянно-цементной массы (искусственного щебня) смесь в сборниках перемешивается мешалкой, затем (в соответствующих пропорциях) добавляются цемент, вода, демеркуризационный препарат Рисол. Для получения специальных свойств вводятся добавки, меняются пропорции материалов в зависимости от того для какой цели будет применен изготовленный щебень. На сборник устанавливается крышка с отверстием (диаметр 50 мм) в центре, в которое вводится небольшой глубинный вибратор, с помощью которого смесь подвергается вибрационному воздействию в течение 2–3 мин. Полученной смесью наполняются формы (лучше пластиковые), которые подбираются в зависимости от конечного предназначения продукта. Для мелкого щебня это могут быть формы для тротуарной плитки, для более крупного щебня – формы для получения полублоков и т. д. Готовый продукт после высыхания дробится или используется целиком (табл. 2). При больших объемах переработки ламп нейтрализованное стекло и другие

ртутьсодержащие материалы перемешиваются и включаются в цементную матрицу в бетоно- или растворомешалках.

Таблица 2. Состав искусственного щебня

Компонент	кг	%
Стекло с включениями	1000	67,4
Уголь активированный, известь, летучая зола (при наличии)	100	6,7
Портландцемент	300	20,2
Вода	< 80 л	< 5,4
Демеркуризационный препарат Рисол	4 л	0,3
Сульфид ртути, HgS	0,1	0,007
Итого	1484	100

Полученный искусственный щебень может найти применение на полигонах и свалках отходов при их обустройстве, строительстве подъездных и внутренних дорог, бетонных площадок и бункеров для временного и постоянного складирования отходов и т. п., при использовании для собственных нужд специализированными организациями – переработчиками ртутьсодержащих отходов. Образцы полученного указанным способом искусственного щебня были размещены в течении года на открытой площадке на решетках с поддонами для периодического сбора атмосферных осадков. Было установлено, что уровни содержания ртути в атмосферных осадках, собранных под решетками, никогда не превышали предельно допустимой концентрации, установленной для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения. Нагрев бетонного щебня до температуры 200°C так же не приводил к значимому росту концентрации паров ртути над нагреваемыми изделиями. Все это свидетельствует о прочной связи ртути с основной матрицей стабилизирующего материала.

Необходимо отметить, что в настоящее время способы иммобилизации ртутьсодержащих (PCO) и других опасных отходов находят широкое практическое применение во многих странах мира, включая США и Западную Европу [7]. Шаблонные способы иммобилизации отходов, в том числе PCO, обычно включают фиксацию содержащихся в них поллютантов (особенно металлов) с применением портландцемента и летучей золы [8]. Различают стабилизацию отходов и солидификацию отходов. Стабилизация (*Stabilization*) отходов – химическая иммобилизация опасных компонентов посредством химического связывания их в немобильную матрицу или химическая конверсия (перевод) поллютантов в немобильные формы, что существенно снижает вероятность их испарения или выщелачивания в окружающую среду. Синонимом стабилизации служит термин «химическая фиксация», а самым известным примером такого процесса – осаждение ртути в виде нерастворимого сульфида. Солидификация (*Solidification*) отходов – процесс физического отверждения отходов, в результате которого происходит цементирование поллютантов и уменьшение поверхностной площади отходов, доступных для испарения или выщелачивания загрязняющих веществ. Поскольку оба процесса нередко используются сопряженно, то говорят о технологии «стабилизации/солидификации» (в американской терминологии «S/S technology»). В США S/S technology широко применяется в известной программе Суперфонда [9]. В частности, к середине 2000 г. она уже была использована на 167 за-

грязненных участках для обработки различных отходов, в том числе имелось 7 завершенных проектов, в которых обрабатывались РСО. Обычно в США стабилизации подвергаются РСО (перед их размещением на свалках) с низким содержанием ртути – менее 260 мг/кг (в американской терминологии – *low mercury subcategory wastes*) [10]. В Швеции существует норматив предельного содержания ртути в отходах, размещаемых на свалках, составляющий 500 мг/кг сухой массы [11, 12]. Для отходов с содержанием более 1% ртути применяется концепция терминального (конечного, длительного, постоянного) хранения, которая базируется на конверсии ртути, содержащейся в отходах, в элементарную ртуть или на переводе ее в химически стабильные формы (например, в HgS) с последующим размещением металлической ртути или обработанных (обезвреженных) отходов в специальных (подземных) хранилищах. Для отходов с содержанием ртути не более 5% предлагается стабилизация/солидификация с применением цемента и последующим формированием монолитов, фиксирующих ртутьсодержащий материал. Указанные способы стабилизации/солидификации относительно недорогие и достаточно эффективные. Исследования показали, что после захоронения (в виде золошлакового монолита) отходов выщелачивание общей ртути из них составляло всего 0,008–0,013% (по массе). В Таиланде предлагается обезвреживать отработанные ЛЛ путем их солидификации с использованием летучей золы лигнита и извести (как заменителя цемента) [13]. Работы последних лет свидетельствуют о том, что стабилизация/солидификация твердых РСО, содержащих до 0,1% ртути, с использованием активированного угля (предварительно импрегнированного серой) и цемента [14], цеолита, функционализированного тиолом, и цемента [15], сульфида [16] является эффективной и экономичной технологией их обезвреживания, а полученный материал отвечает требованиям теста на токсичность.

По нашему мнению, технологический мини-комплекс «Экотром-2У» по обезвреживанию и утилизации ЛЛ и образующихся при их переработке материалов может найти широкое применение как в областных центрах, так и в других населенных пунктах нашей страны, особенно в отдаленных ее районах, где объемы ежегодно выходящих из строя ламп относительно невелики.

Список литературы

1. Тимошин В.Н., Макаренко Г.В. Установка «Экотром-2» – эффективное решение проблем утилизации ртутных ламп // Экологические системы и приборы, 2006, № 3, с. 16–19.
2. Кочуров А.В., Тимошин В.Н. О решении проблем утилизации энергосберегающих ртутьсодержащих ламп // Светотехника, 2010, № 3, с. 43–44.
3. Тимошин В.Н., Тиняков К.М., Макаренко Г.В., Кочуров А.В., Янин Е.П. Пневмовибрационные способы утилизации энергосберегающих люминесцентных ламп // Экономика природопользования, 2011, № 6, с. 67–71.
4. Doughty D.A. Wilson R.N., Thaler E.G. Mercury-glass interaction in fluorescent lamps // J. Electrochem. Soc., 1995, 142, № 10, p. 3542–3551.
5. Янин Е.П. Ртутные лампы: опасность для окружающей среды // Экология производства, 2010, № 2, с. 53–55.
6. Янин Е.П. Состояние и проблемы утилизации ртутных ламп в России // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2010, № 2, с. 25–84.

7. Hagemann S. Technologies for the stabilization of elemental mercury and mercury-containing wastes. Final Report. GRS – 252: Oktober 2009. – 57 p.
8. Randall P., Chattopadhyay S. Advances in encapsulation technologies for the management of mercury-contaminated hazardous wastes // *J. Hazardous Materials*, 2004, B114, p. 211–223.
9. Solidification/Stabilization Use at Superfund Sites. EPA-542-R-00-010, September 2000 / <http://www.epa.gov>.
10. Янин Е.П. Особенности обращения с ртутьсодержащими отходами в США // *Ресурсосберегающие технологии*, 2011, № 9, с. 11–17.
11. Svensson M. Mercury Immobilization. A Requirement for Permanent Disposal of Mercury Waste in Sweden. *Academisk avhandling*. – Örebro: Örebro universitet, 2006. – 46 p.
12. Svensson M., Allard B. Leaching of mercury-containing cement monoliths aged for one year // *Waste Management*, 2008, v. 28, p. 597–603.
13. Jekjuntuk P., Yuwaree C., Theeraraj G. et al. Lime and Lignite Fly Ash as Cement Replacement in Hazardous Waste Solidification Process: Case Study of Spent Fluorescent Lamp // *Environment and Natural Resources Journal*, 2009, v.7, № 2, p. 56–71.
14. Zhang J., Bishop P.L. Stabilization/solidification (S/S) of mercury-containing wastes using re-activated carbon and Portland cement // *J. of Hazardous Materials*, 2002, B92, p. 199–212.
15. Zhanga X.-Y., Wang Q.-C., Zhanga S.-Q. et al. Stabilization/solidification (S/S) of mercury-contaminated hazardous wastes using thiol-functionalized zeolite and Portland cement // *Journal of Hazardous Materials*, 2009, v. 168, p. 1575–1580.
16. Piao H., Bishop P.L. Stabilization of mercury-containing wastes using sulfide // *Environmental Pollution*, 2006, v. 139, p. 498–506.