

**Янин Е.П.**

**Опыт ремедиации загрязненной ртутью территории (город Марктредвиц, Германия) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2009, № 9, с. 70-95.**

Введение

1. Характеристика района
  2. Особенности ртутного загрязнения территории
  3. Описание технологии Харбауэр
    - 3.1. Общая характеристика
    - 3.2. Промывка почвы
    - 3.3. Вакуумная дистилляция
    - 3.4. Очистка отходящего воздуха и технологических вод
  4. Цели и итоги демонстрационного проекта
  5. План ремедиации участка
  6. Общий ход выполнения работ по ремедиации территории
- Заключение

Введение

Необходимость ремедиации (очистки) территорий, загрязненных тяжелыми металлами и другими химическими веществами, чрезвычайно актуальна для многих стран мира, включая Россию. Особую проблему представляет загрязнение городов и промышленных центров ртутью. Например, в зонах влияния российских хлорно-щелочных, целлюлозно-бумажных, электроламповых, приборостроительных заводов, предприятий по производству хлорвинила, красителей, изотопов лития, добычи и производству ртути существуют обширные зоны ртутного загрязнения [3, 4, 6, 7-11, 13, 15]. Суммарное количество аккумулированной в почвогрунтах указанных территорий ртути оценивается не менее чем в 3000 т. Если во многих странах мира уже законодательно установлены пороговые уровни ртути в почвах, грунтах и подземных водах, определяющие обязательность санации территорий, обоснован регламент проведения работ по их ремедиации и внедрены в практику эффективные способы деконтаминации загрязненных ртутью почв и грунтов [1, 2, 12, 14], то в России указанные вопросы находятся в основном в стадии обсуждения и начальной разработки.

В предлагаемом обзоре систематизированы доступные в литературе и других средствах информации сведения о проекте ремедиации загрязненной ртутью территории, реализованного в 1990-х гг. в г. Марктредвице (Германия, Бавария), где длительное время (с 1788 г.) функционировала химическая фабрика, производившая ртутные соединения и различные химикаты, что привело к значительному загрязнению строительных конструкций, почв, грунтов, грунтовых вод и водотоков ртутью и некоторыми другими химическими веществами. Проект включал демонтаж загрязненных фабричных конструкций и оборудования, изъятие (экскавацию) почвогрунтов, их сортировку по интенсивности ртутного загрязнения, захоронение на специальной свалке и(или) переработку (с получением металлической ртути) на специально созданном для этих целей заводе, очистку водотоков и подземных вод, общую санацию территории и подготовку ее к multifunctional использованию. В основу завода по переработке ртутьсодержащих материалов была положена технология фирмы «*Harbauer GmbH & Co. KG*» (г. Берлин, Германия), основанная на комбинировании процессов «soil washing» (промывки, отмучивания, обогащения) почвогрунтов и других предварительно измельченных отходов и термальной переработки (вакуумной дистилляции) полученного концентрата (Harbauer soil washing/vacuum-distillation technology).

Данный проект считается одним из крупнейших европейских примеров ремедиации экстремальной экологической ситуации, обусловленной ртутным загрязнением [25, 28, 34, 49, 52, 64]. Он также является первым полномасштабным промышленным применением эффективной и перспективной технологии Харбауэр для переработки значительных объемов ртутьсодержащих отходов. Есть надежда, что приводимый ниже материал будет не только интересен, но и полезен российским исследователям, специалистам-практикам и работникам соответствующих организаций и служб, деятельность которых связана с оценкой и ликвидацией последствий техногенного загрязнения промышленно-урбанизированных территорий.

## 1. Характеристика района

Город Марктредвиц расположен на востоке Баварии, недалеко от границы с Республикой Чехия, в административном округе Верхняя Франкония (центр – г. Байройт), район Вунзидель-Фихтель, (рис. 1). Верхняя Франкония является одним из самых индустриальных центров Европы, где число работников, занятых в промышленности, на 1000 чел. населения в 1999 г. составляла 122, что на 40% выше среднего федерального показателя [58, 59]. Первое упоминание о г. Марктредвице относится к 1140 г. (тогда он носил название Редвиц). В настоящее время население города, разделенного на 23 городских района, составляет около 18 тыс. чел., общая площадь городской территории – 49,56 км<sup>2</sup>, из которых на застройку (здания, улицы, площади и пр.) приходится 10 км<sup>2</sup>, на агротерритории – 25 км<sup>2</sup>, лесопарковые участки – 14 км<sup>2</sup>.

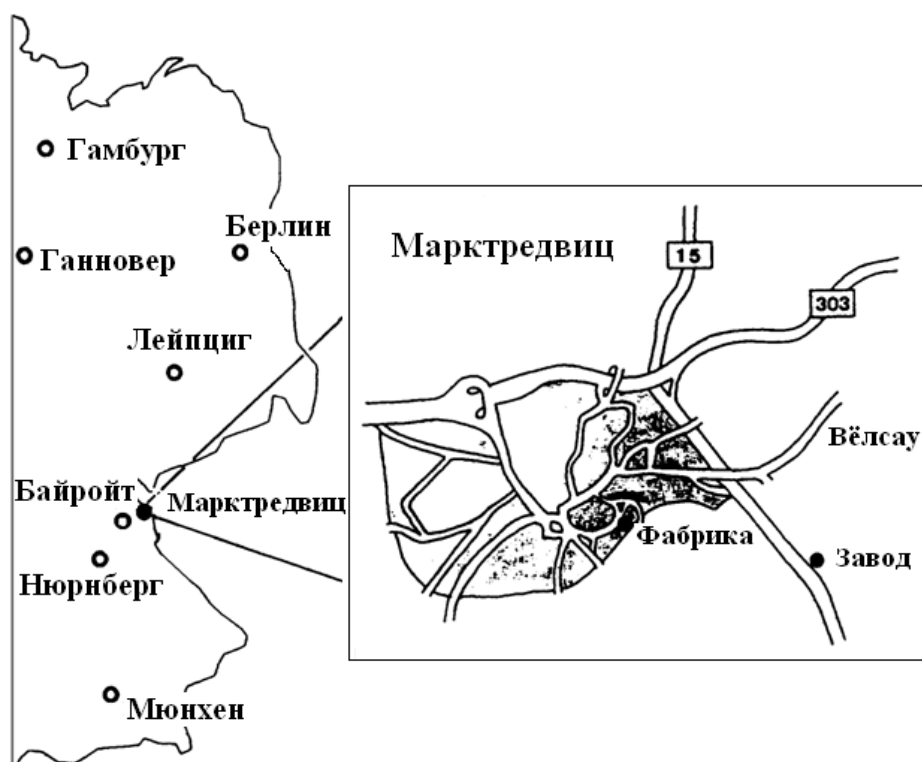


Рис. 1. Схема расположения г. Марктредвица, химической фабрики, завода Харбауэр и свалки в Вёлсау [32].

Химическая фабрика в г. Марктредвице была основана (как химическая лаборатория) 24 июля 1788 г. Вольфгангом Каспаром Фикентшером (1770-1837), фармацевтом из Нюрн-

берга (его имя носит одна из улиц города). Фабрика расположена в историческом центре города (так называемом «внутреннем городе», площадь которого составляет ~ 50 тыс. м<sup>2</sup>), на берегу небольшого водотока Кёсайне, впадающего в р. Рёслау. Это первое в Германии и одно из старейших в мире предприятие химической промышленности [38, 62]. Практически до конца XIX в. здесь осуществлялось производство красного оксида и других соединений ртути, фосфора, азотной и бензойной кислот, соединений сурьмы, химикатов для стекольной промышленности, проводились работы, связанные с очисткой золота (методом амальгамации). Продукция фабрики поставлялась в разные немецкие города, а также в другие страны (включая Россию). Известно, что в августе 1822 г. химическую лабораторию в г. Марктредвице посетил И.-В. Гёте. В 1889 г. «*Firma W. C. Fikentscher*» (позднее «*Chemische Fabrik Marktrechwitz*») была приобретена братьями О.-Б. и К.-Б. Тропитцш, которые интенсифицировали производство агрохимикатов и различных ртутных соединений. В 1907 г. на фабрике было получено первое ртутное дезинфицирующее средство (ртутный дезинфектант). В 1912 г. здесь началось производство протравителей семян на основе ртути, а также других агрохимикатов (медный купорос и др.). С 1950-х гг. на фабрике стал осуществляться синтез органических пестицидов (ртуторганических, атразина, линдана и др.). В первой половине 1980-х гг. в списке основной продукции данного предприятия присутствовали 24 неорганических и 18 органических соединений ртути [36]. В 1885 г. рядом с химической фабрикой был открыт стекольный завод, на базе которого в 1925 г. было организовано производство абразивных материалов (с 1928 г. компания «*STELLA Schleifmittelwerk*», ставшая основой известной промышленной группы «*STELLA KERAMIK*») [33].

В начале 1970-х гг. в немецкой прессе появляются первые сообщения о неблагоприятной экологической ситуации, сложившейся в районе химической фабрики в Марктредвице, о негативном влиянии ртути на ее работников, о высоких содержаниях металла в осадках городских сточных вод, в воде и донных отложениях р. Кёсайне. В конце 1970-х гг. данная ситуация в немецких средствах массовой информации характеризовалась как «*Quecksilber-Skandal*» («ртутный скандал»), «*eine unglaubliche Sauerei*» («невероятное свинство, грязь»), «*spektakulärste Umweltskandal der Bundesrepublik*» («сенсационный экологический скандал в Германии»), «*größter Umweltskandal Europas*» («большой европейский экологический скандал») и т. п. [23]. Особо отмечалось, что многие работники «имевшей дурную славу химической фабрики» (цитата из известного немецкого журнала «Дер Шпигель») потеряли здоровье из-за хронического отравления ртутью, в крови и моче которых наблюдались ее чрезвычайно высокие концентрации [24]. О негативном воздействии ртути на рабочих фабрики в Марктредвице рассказывается в специальном документальном фильме [40]. Уже в 1977 г. ставится вопрос о необходимости санации исторической части г. Марктредвица. В начале 1980-х гг. появляются результаты первых натуральных исследований, показавших, что здания, почвогрунты и подземные воды в районе химической фабрики интенсивно загрязнены ртутью и некоторыми другими химическими элементами и веществами.

В июне 1985 г. правительство Баварии, руководствуясь существующим законодательством, аннулировало лицензию предприятия, и оно было закрыто [20]. По данным [18], формальной причиной для этого послужили чрезвычайно высокие концентрации ртути в сточных водах (до 29 мг/л), сбрасываемых в р. Кёсайне. По сведениям [22], в сбросном канале, по которому сточные воды поступали в указанный водоток, содержание ртути достигало 160 мг/л. Согласно [42], в июне 1985 г. представители Управления водного хозяйства Баварии установили, что в инфильтрационных водах, поступающих в водоток Кёсайне, содержание ртути составляло около 200 мг/л. Предварительные исследования территории

фабрики, выполненные в 1986 г., подтвердили наличие сильного ртутного загрязнения строительных конструкций, почвогрунтов, поверхностных и подземных вод в ее районе. В 1988 г. правительство Федеральной земли Баварии приняло решение о полномасштабной ремедиации загрязненного ртутью участка, сформировавшегося в пределах промзоны химической фабрики «*Chemische Fabrik Marktrechwitz*» [54, 62]. В 1992 г. было принято решение и о санации территории расположенного рядом производства абразивных материалов (фабрики «*STELLA Schleifmittelwerk*»), загрязнение которой было обусловлено главным образом деятельностью химической фабрики [64].

## 2. Особенности ртутного загрязнения территории

Исследования, выполненные в пределах промзоны химической фабрики и ее окрестностей в конце 1980-х – начале 1990-х гг., установили значительное загрязнение строительных материалов, почв, грунтов, донных отложений и грунтовых вод ртутью и некоторыми другими химическими веществами [16, 18, 20, 25, 32, 33, 49, 57]. Ртуть была признана главным поллютантом (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики почвогрунтов промзоны химической фабрики

Показатель	Содержания в почвогрунтах, мг/кг
Ртуть *	200-5000
Сурьма **	50-500
Общие фенолы	~ 10
Общие извлекаемые нефтяные углеводороды	~ 30
Общие бензол, толуол, этилбензол и ксилены	~ 20
Общие хлорированные углеводороды	~ 25
Влажность, %	~ 15-20
Доля частиц размером < 2 мм, %	~ 70

\* Типичное фоновое содержание ртути в почвах мира варьируется в пределах 0,05-0,13 мг/кг; кларк ртути в земной коре (по данным разных авторов) – 0,03-0,089 мг/кг.

\*\* Кларк сурьмы в осадочных породах (по А.П. Виноградову) – 2 мг/кг.

Так, в почвогрунтах промзоны, представленных техногенными отложениями, глинами, гравием и разрушенными гнейсами, концентрации ртути (до глубины 4 м) изменялись от 200 до 5000 мг/кг, причем типичные ее уровни находились в пределах 1000-2000 мг/кг, что существенно выше допустимого содержания. (Согласно Декрету о защите почв и утилизации отходов ФРГ, предельная концентрация ртути в почвогрунтах промышленных территорий установлена в 80 мг/кг.) С увеличением глубины (т. е. вниз по профилю) интенсивность ртутного загрязнения уменьшалась. Ртуть и некоторые другие поллютанты в высоких концентрациях присутствовали в строительных конструкциях (в штукатурке, кирпичах, бетоне). Например, в поверхностных слоях кирпичей (главным образом в штукатурке) ее уровни изменялись от 400 до 3300 мг/кг. В экстремально высоких количествах (несколько тысяч мг на кг) ртуть концентрировалась в материале подземных коллекторов и выгребных ям. Из других элементов повышенными и даже высокими уровнями (в строительных материалах и почвогрунтах) отличались сурьма, мышьяк, свинец, кадмий. В почвах присутствовали органические гербициды и пестициды, некоторые другие органические соединения. В почвогрунтах территории фабрики абразивных материалов «*STELLA Schleifmittelwerk*», площадь которой составляла 26500 м<sup>2</sup>, концентрации ртути достигали 600 мг/кг, сурьмы – 1600 мг/кг, в повышенных уровнях присутствовали никель, кобальт, титан, ванадий, хром, мышьяк, ми-

неральные масла, полициклические ароматические углеводороды. Концентрации ртути в грунтовых водах составляли около 1,8 мг/л.

Для определения количества загрязненного материала, подлежащего изъятию и последующей переработке, использовалась контрольная (нормативная) концентрация ртути в 50 мг/кг. Было установлено, что масса почвогрунтов и строительного мусора (от демонтажа зданий), в которых концентрации ртути превышают указанную величину, составляет примерно 102 тыс. т, причем около 57 тыс. т характеризуется содержаниями металла в пределах 300-5000 мг/кг.

Длительный сброс сточных вод химической фабрики в р. Кёсайне обусловил интенсивное загрязнение водотока и его поймы [41]. По данным [53], уровни ртути в пойменных и русловых наносах составляли 50-200 мг/кг. Согласно [36], максимальные концентрации ртути в отложениях р. Кёсайне достигали 269 мг/кг, причем существенная доля металла была представлена его органическими соединениями (метил- и этилртутью), максимальные уровни которых наблюдались вблизи фабрики и заметно снижались вниз по течению (рис. 2).

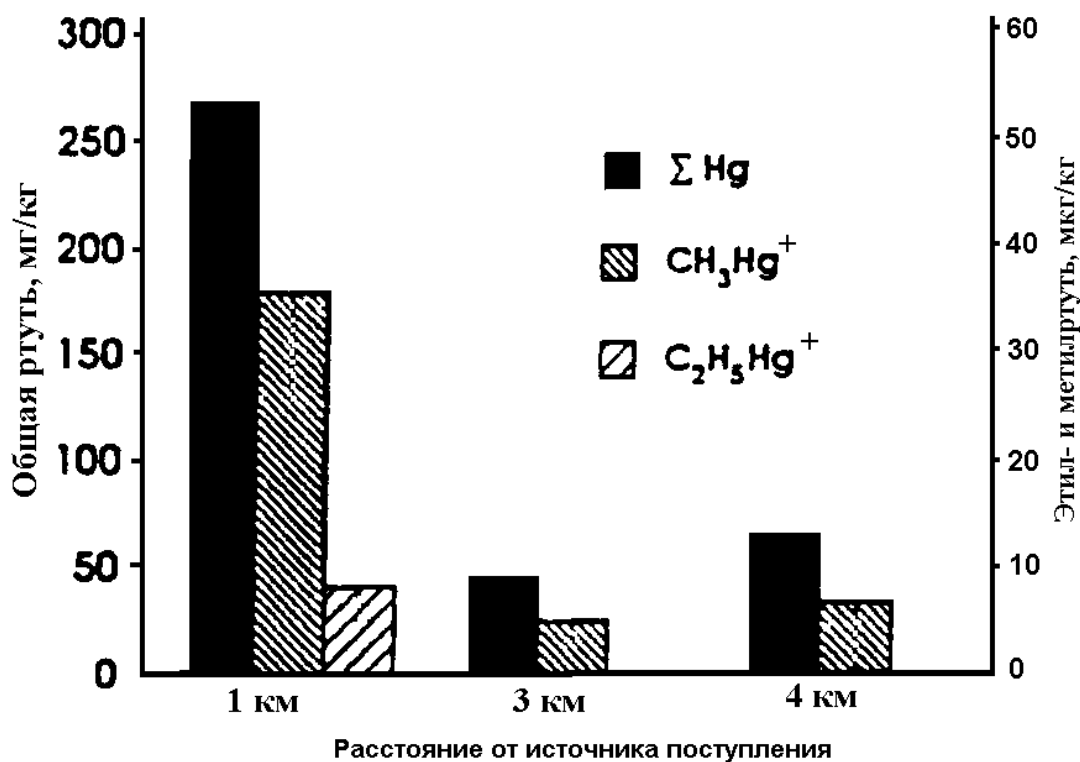


Рис. 2. Общая и органическая ртуть в отложениях р. Кёсайне [ ].

Уровни метилртути в отложениях на всем изученном отрезке р. Кёсайне превышали ее природный фон, составляющий 1 мкг/кг. Этилртуть (предел обнаружения 0,1 мкг/кг) была обнаружена только на отрезке русла протяженностью около 1 км от источника загрязнения. Авторы цитируемой работы считают, что соединения этилртути поступали со сточными водами фабрики (последний список продукции фабрики включал 4 вида соединений этилртути), тогда как присутствие метилртути в отложениях обусловлено протекающими в них микробиологическими процессами (список продукции фабрики не содержал метилртутных соединений). Изучение распределения ртути в пробах почв (верхний 20 см слой), отобранных на берегу (в пойме) р. Кёсайне вблизи фабрики, показало, что концентрация общей ртути

ти достигает  $65,3 \pm 9,5$  мг/кг сухой массы, метилртути –  $7 \pm 3$  мкг/кг, этилртути –  $4 \pm 3$  мкг/кг [35]. Загрязнение пойменных почв было обусловлено разливами реки, особенно весной.

Сброс сточных вод химической фабрики в г. Марктредвице привел к загрязнению ртутью не только р. Кёсайне, но и рек следующего порядка – р. Рёслау и р. Эгер (притока Эльбы), а также созданного на Эгере (уже в пределах Республики Чехии) водохранилища Скалка [43, 47, 55]. Так, в отложениях указанного водохранилища (особенно в его верховьях) содержания ртути на порядок больше, чем в донных отложениях водохранилищ, созданных на соседних реках Чехии [55]. Показательно, что наивысшие концентрации общей ртути характерны для глубоких слоев отложений водохранилища Скалка, что, безусловно, является отражением высокой ртутной нагрузки на водные системы в прошлые годы, обусловленной сбросом сточных вод химической фабрики в Марктредвице и инфильтрацией в р. Кёсайне загрязненных грунтовых вод. В повышенных количествах общая ртуть и метилртуть обнаруживаются также в мышцах рыб, выловленных в указанных реках и водохранилище Скалка, причем уровни этих поллютантов выше, иногда существенно, чем в большинстве других притоков р. Эльбы [44, 56]. По данным [47], наивысшие средние концентрации общей ртути в мышцах рыб составляют 3,41 мг/кг (максимальные – до 6,81 мг/кг); минимальные (местный фон) содержания общей ртути в мышцах рыб оцениваются в 0,07 мг/кг [44]. Считается, что р. Эгер является одним из наиболее загрязненных ртутью притоков р. Эльбы.

### 3. Описание технологии Харбауэр

Технология (система) Харбауэр (Harbauer Treatment System), разработанная немецкой инновационной инженерно-технической фирмой «*Harbauer GmbH & Co KG*» (г. Берлин), запатентована в Европе (патент № EP0388387) и в США, где ее представляет «*Lockwood Green Engineers, Inc*» [25, 26, 29, 30-32, 49, 60]. Технология, основанная на промывке (обогащении) почв и вакуумной дистилляции полученного концентрата, сочетает химические и физические процессы для удаления из почв и подобных материалов адсорбированных, растворенных и свободных поллютантов и может использоваться для ремедиации почвогрунтов и других материалов, загрязненных летучими органическими соединениями и тяжелыми металлами (прежде всего, ртутью). Особенно эффективна данная технология для удаления ртути из песчано-суглинистых и суглинистых почв и грунтов. В настоящее время технология Харбауэр находит применение в Германии, Нидерландах, США.

#### 3.1. Общая характеристика

Завод Харбауэр, имеющий контейнерно-модульное построение и общую площадь около 1 га, был построен недалеко от г. Марктредвице (см. рис. 1). На установку и наладку оборудования потребовалось около 1 года. Используемая на заводе технология позволяет перерабатывать такие материалы, как почвы, грунты, строительный мусор, пористый материал (кирпич, шлак, бетон) с максимальным размером частиц 60 мм. При целевом нормативе демеркуризации в 50 мг/кг и реальных содержаниях ртути в перерабатываемых материалах от 500 до 2000 мг/кг ее уровни в обработанном материале снижались до 20-25 мг/кг и менее (степень очистки от ртути достигает 98-99%).

Основные (проектные) технические характеристики завода Харбауэр: электрическая мощность – 1500 кВт; удельное потребление электроэнергии – 130 кВт-час/т; производитель-

ность: обогащение почв – ~ 25 т/час, дистилляция – ~ 6 т/час; температура процесса дистилляции – 350-450<sup>0</sup>С; диапазон давления – 50-150 гектопаскаль; количество отходящего воздуха – 45 тыс. м<sup>3</sup>/час; потребность в свежей воде – 0-10 м<sup>3</sup>/час; удельное водопотребление – 0,5 м<sup>3</sup>/т; расход сточных вод – рециркуляция.

Завод Харбауэр полностью автоматизирован, может работать непрерывно; его основное оборудование размещено в замкнутом (герметичном) контуре (рис. 3). Как уже отмечалось, технология Харбауэр включает два основных процесса: промывку (отмучивание, обогащение) изъятых (экскавацией) почвогрунтов и других загрязненных материалов (строительный мусор и т. п.) и вакуумную дистилляцию полученного концентрата. Составной частью завода являются системы очистки технологических вод и отходящих газов (пылегазо-выбросов). Установка промывки (отмучивания, обогащения) почв предназначена для выделения из общей массы перерабатываемого материала сильно загрязненные илистые и глинистые фракции (с размером частиц от < 0,1 до 8 мм) – своего рода концентрат, который направляется на температурную переработку (вакуумную дистилляцию). Обоганительное производство включает следующие процессы: дробление (измельчение) материала и отделение фракции 0,06 м; влажное просеивание и гравитационную сепарацию жидкого загрязненного материала; истирание для удаления тонких частиц из грубого материал; обезвоживание и классификацию образующихся потоков отходов. Фракции песка и щебня отделяются как чистый наполнитель. Тонкая фракция (< 0,008 мм) концентрируется в сгустителях, обезвоживается в фильтрационных камерах (на фильтр-прессах) и затем подается в устройство вакуумной дистилляции ртути. Температурная переработка концентрата является двухстадийной и включает температурную десорбцию при 100<sup>0</sup>С для уменьшения (до 1%) влажности материала и последующую вакуумную дистилляцию при более высокой температуре.

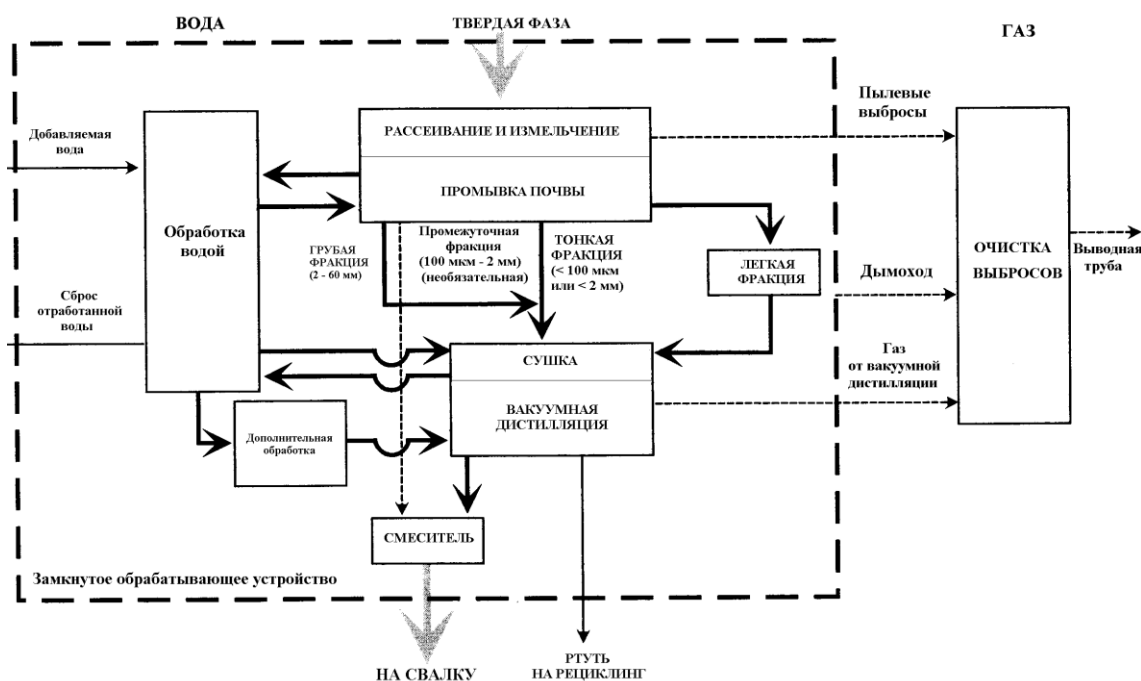


Рис. 3. Общая схема завода Харбауэр [32].

Как сказано выше, промывка разделяет почву на грубые и тонкие фракции. Если в грубых фракциях (размером от 2 до 60 мм) содержание ртути меньше 50 мг/кг, то они на-

правлялись на фабричную свалку. Если же уровни ртути в грубых фракциях были  $\geq 50$  мг/кг, то этот материал дробился и затем подвергался вакуумной дистилляции. Тонкие фракции почв (менее 2 мм), содержащие ртуть в концентрациях свыше 5000 мг/кг, также подвергались вакуумной дистилляции. В некоторых вариантах технологии Харбауэр предусматривается получение так называемой промежуточной («необязательной») фракции почв (размером 100 мкм – 2 мм), но в данном проекте она не выделялась. В ходе вакуумной дистилляции осуществляется нагрев полученного концентрата в вакууме для возгонки и удаления из него ртути. Нагрев осуществляется до температуры примерно  $380^{\circ}\text{C}$  при пониженном давлении (100-200 гектопаскаль). Как известно, точка кипения элементарной ртути составляет примерно  $350^{\circ}\text{C}$  при 1014 гектопаскаль (при давлении в 1 атмосферу), но при пониженном давлении ртуть возгоняется более интенсивно. Возгоняемые пары ртути поступают в мультисекционный водный холодильник (конденсатор), где происходит конденсация металлической ртути. Обработанные тонкие фракции почвы, содержащие остаточную ртуть в пределах 11-31 мг/кг, смешивались с грубыми фракциями, содержащими менее 50 мг/кг ртути, и размещались на фабричной свалке.

### 3.2. Промывка почвы

Термин «soil washing» (промывка, отмучивание, обогащение почв) используется в США и в Европе для названия технологии ремедиации почвогрунтов и других материалов, основанной на физической сепарации или химической экстракции либо на совмещении обоих процессов [19, 21, 27, 37, 45]. В общем случае процесс «soil washing» включает экскавацию почвогрунтов, механическое удаление (отсеивание) крупногабаритных материалов из основной массы почвогрунтов, их сепарацию для разделения на грубо- и тонкозернистые фракции, обработку этих фракций (собственно промывку почвогрунтов) и управление образовавшимися остатками. Процесс удаления загрязняющих веществ из почв осуществляется одним из следующих способов: а) растворением или суспендированием их в промывочном растворе (может использоваться обычная вода, иногда с добавками поверхностно-активных веществ и других агентов), который затем обрабатывается общепринятыми методами очистки сточных вод, б) концентрированием их внутри меньшего объема почвы посредством простой сепарирующей техники. Эффективность технологии «soil washing» для разных поллютантов и типов почв показана в табл. 2.

Концепция технологии промывки базируется на том, что многие поллютанты имеют тенденцию связываться (физически или химически) с глинистыми и илистыми (т. е. с наиболее тонкими) частицами почв и грунтов. Тонкие фракции перерабатываются или вывозятся на специальные свалки, грубые – возвращаются на место или используются для каких-либо других целей. Таким образом, основной целью промывки почвогрунтов является отделение тонких (илистых и глинистых) частиц от грубых. Данная технология обычно применяется как предварительный процесс уменьшения объема исходного загрязненного продукта, окончательная переработка которого завершается другими методами (термальными, биоремедиацией и т. п.), и считается одной из самых успешных в последние 15 лет [63]. В общем случае после промывки почвогрунтов образуются: 1) чистые песок и гравий, которые нетоксичны и могут использоваться для засыпки (планировки) местности, 2) чистые ил и глина, которые нетоксичны и могут использоваться для засыпки, 3) меньшее по объему количество почвы, которая включает преимущественно тонкие илисто-глинистые частицы и(или) орга-



ническую фракцию, содержащие поллютанты, и которые могут перерабатываться другим способом или размещаться на свалках в соответствии с существующими требованиями, 4) промывные воды, которые могут обрабатываться на месте и(или) сбрасываться в канализацию.

Таблица 2. Пригодность способа промывки для очистки почв [27]

Группы поллютантов	Почвы *	
	Песчаные/гравийные	Илистые/глинистые
	Органические	
Галогенизированные летучие	■	▼
Галогенизированные полуметучие	▼	▼
Негалогенизированные летучие	■	▼
Негалогенизированные полуметучие	▼	▼
ПХБ	▼	▼
Пестициды (галогенизированные)	▼	▼
Диоксины/фураны	▼	▼
Цианиды	▼	▼
Разъедающие вещества	▼	▼
	Неорганические	
Летучие металлы	■	▼
Нелетучие металлы	■	▼
Асбест	□	□
Радиоактивные вещества	▼	▼
Разъедающие вещества	▼	▼
Цианиды	▼	▼
	Реакционно-способные	
Окислители	▼	▼
Восстановители	▼	▼

\* ■ – хорошая применимость; ▼ – умеренная применимость; □ – не применимо.

Наиболее широкое применение получила водно-механическая сепарация (водная классификация) загрязненного материала, которая и использовалась в г. Марктредвице. Она включает несколько стадий обработки почвогрунтов и других материалов: предварительное отсеивание, дробление (если требовалось), лопастную промывку, отсеивание, истирание в скребнице (скруббере), гидравлическую классификацию посредством осаждения или гидравлическую сортировку, окончательное отсеивание. Общая схема процесса промывки выглядит следующим образом (рис. 4). Изъятые почвогрунты механически просеиваются на виброрешете для отделения частиц менее 60 мм в диаметре. Материал крупнее 60 мм в диаметре дробится на механической дробилке и направляется на отсеивающее устройство. После предварительного отсеивания и дробления обрабатываемый материал подается посредством инкапсулированного ленточного конвейера (транспортера) на наивысшую точку перерабатывающего оборудования и затем транспортируется вниз (посредством гравитации), подвергаясь различным промывочным и разделительным процессам. Прежде всего, материал поступает (непрерывно) в двухлопастной промыватель, где смешивается с водой (в пропорциях 1 м<sup>3</sup> воды и 1 т почвы). Непрерывность подачи материала поддерживается специальной контролирующей системой. Затем жидкая смесь почвы и воды («жидкая грязь», «водно-почвенная смесь»), выходящая из промывателя, подается в устройство отсеивания, состоящего из двойного сита (грохота) и гидроциклона. Частицы диаметром < 100 мкм проходят через решетки (через отсеиватель) и циклон и отделяются от жидкой грязи, которая, в свою очередь, откачивается в устройство вакуумной дистилляции. Частицы обрабатываемого материала диаметром от 100 мкм до 2 мм подаются в истирающий скруббер, где допол-

нительно добавляется рециркулируемая вода, а образующаяся жидкая грязь интенсивно смешивается (эта стадия в данном проекте не применялась). В ходе смешивания поверхностное загрязнение удаляется из грубых фракций в результате абразии частиц друг о друга.

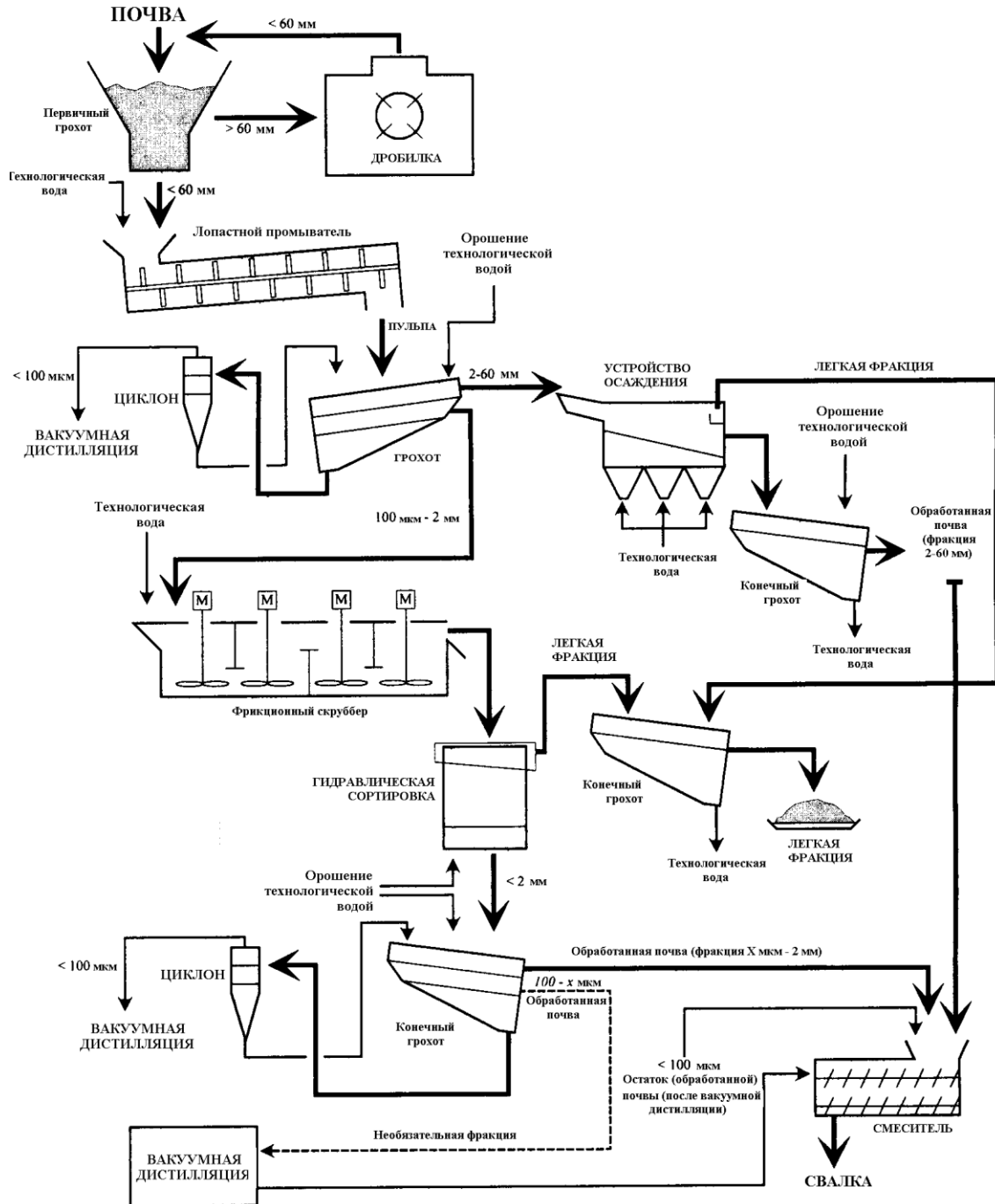


Рис. 4. Схема процесса промывки (отмучивания) почв [32].

Из скруббера водно-почвенная смесь поступает на гидравлическую сортировку, где из водного потока (посредством отсеивания и отмучивания) удаляются всплывающие частицы, которые собираются в специальный бункер. Оставшаяся водно-почвенная смесь подается в циклон, где при разрушении (в результате истирания в скребнице) крупных частиц или ком-

ков образуются зерна размером  $< 100$  мкм, которые отделяются и откачиваются в устройство вакуумной дистилляции. Частицы материала размером  $> 100$  мкм, отделяемые от технологической воды отсеиванием, отмучиваются путем разбрызгивания воды и затем по вертикальной разгрузочной трубе подаются в смеситель, где происходит их смешивание с обработанной тонкой фракцией, поступающей из устройства вакуумной дистилляции. Грубые твердые частицы, отделяемые на начальной стадии отсеивания, подаются в устройство осаждения, где легковзвешивающаяся (всплывающая) фракция удаляется и затем добавляется к всплывающей фракции размером  $100$  мкм –  $2$  мм для окончательного разделения и сбора в бункерах. Наиболее тяжелая грубая фракция, отделяемая в устройстве осаждения, направляется на конечную стадию промывки (отсеивания/разбрызгивания), перед этим смешиваясь с промежуточной отмытой фракцией (размером  $100$  мкм –  $2$  мм) и обработанной в дистилляторе тонкой фракцией. Время полного цикла отмытки одной порции загрязненного материала составляет  $\sim 25$  мин., а максимальное количество обрабатываемого материала – до  $20-25$  т/час.

### 3.3. Вакуумная дистилляция

Вакуумная дистилляция включает 4 стадии обработки концентрата (жидкой грязи): механическое обезвоживание, сушку, дистилляцию (нагревание до температуры возгонки ртути), охлаждение (рис. 5). Сушильный аппарат, установка вакуумной дистилляции и холодильник имеют внешний диаметр до  $3$  м, длину  $10$  м и вращаются со скоростью  $10$  об/мин. Перед механическим обезвоживанием в концентрат добавляются феррогранулы и полимерные флокулирующие агенты, увеличивающие способность металлов к флокуляции и способствующие агрегированию тонких частиц, их оседанию и отделению от воды. Образующийся твердый осадок подвергается механическому обезвоживанию на фильтр-прессе, что позволяет минимизировать потребление энергии при последующем процессе сушки. Вода, отделяемая в ходе концентрирования и обезвоживания перерабатываемого материала, направляется на первичную очистку. Тонкий осадок с пресс-фильтра подается конвейером в верхнюю часть установки вакуумной дистилляции и проходит (под действием гравитации) через различные технологические устройства. Прежде всего, он поступает во вращающийся барабан-сушилку, который нагревается (косвенно) паром до  $\sim 100^{\circ}\text{C}$ . Время пребывания осадка в сушилке составляет  $\sim 30$  мин., в течение которого он высушивается до остаточного содержания влаги  $< 1\%$  от массы. Отходящий газ, образующийся на этой стадии, обрабатывается в специальных устройствах. Затем осадок подается в вакуум-дистилляционное устройство, представляющее собой вращающийся цилиндрический барабан, нагреваемый (косвенно) сжигаемым пропаном. При давлении в  $100-200$  гектапаскаль и средней температуре нагрева в  $380^{\circ}\text{C}$  ртуть и другие летучие компоненты возгоняются из осадка. Считается, что вакуумная дистилляция исключает недостаток, свойственный обычным температурным процессам переработки отходов. В частности, при относительно умеренной тепловой обработке не изменяется минеральная структура обрабатываемых почв (что не исключает возможности их дальнейшего использования). Кроме того, вакуумная дистилляция обуславливает только от  $1/20$  до  $1/30$  эмиссии вредных веществ, наблюдаемой при сжигании отходов по традиционной технологии. После обработки в дистилляторе осадок подается винтовым конвейером в холодильник (охлаждаемый водой барабан). Охлаждаемый осадок (температура менее  $50^{\circ}\text{C}$ ) проходит двойную вакуумную камеру и поступает в смеситель через лен-

точный конвейер и вертикальную разгрузочную трубу. Пары ртути восстанавливаются конденсацией. Система Харбауэр полностью инкапсулирована и заключена в слабом вакууме. Расчеты показывают, что примерно 90% ртути, присутствующей в перерабатываемом материале, в конечном счете конденсируется и извлекается в виде жидкого металла.

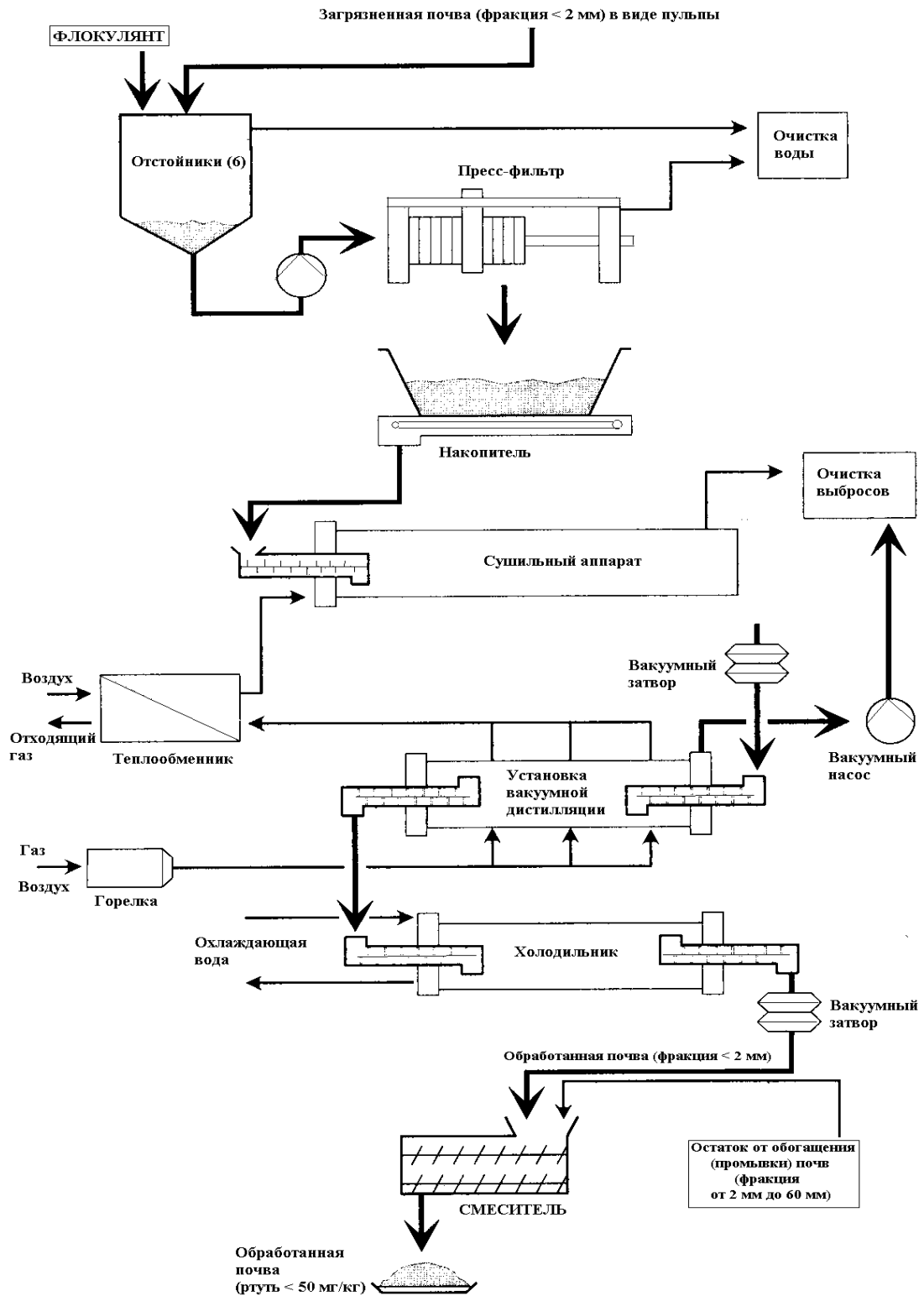


Рис. 5. Схема процесса вакуумной дистилляции [32].

Время обработки одной загрузки отходов составляет примерно 30 мин.; производительность – 4 т/час. Остаток обработки, содержащий от 5 до 30 мг/кг ртути, смешивается с отмытыми грубыми фракциями и размещается на фабричной свалке. Если в остатке содержится более 50 мг/кг ртути, то он возвращается на повторную переработку. Влажность обработанных почв составляет менее 1%. В ходе переработки из почвы удаляются также летучие органические загрязнители (поверхностно-активные вещества, фенолы, растворители и др.).

### 3.4. Очистка отходящего воздуха и технологических вод

Завод Харбауэр оснащен эффективными системами очистки технологической воды и отходящих технологических газов. Отходящие газы практически полностью улавливаются и обрабатываются перед выбросом в атмосферу (рис. 6). Производительность очистки технологических газов составляет примерно 40 тыс. м<sup>3</sup>/час. Газы, в относительно небольшом количестве отходящие от устройства конденсации (примерно 500 м<sup>3</sup>/час.), обрабатываются в обычном (традиционном) влажно-газовом скруббере и затем смешиваются с большим количеством воздуха, поступающего от внутренней вентиляционной системы, которой оборудованы производственные помещения завода Харбауэр.

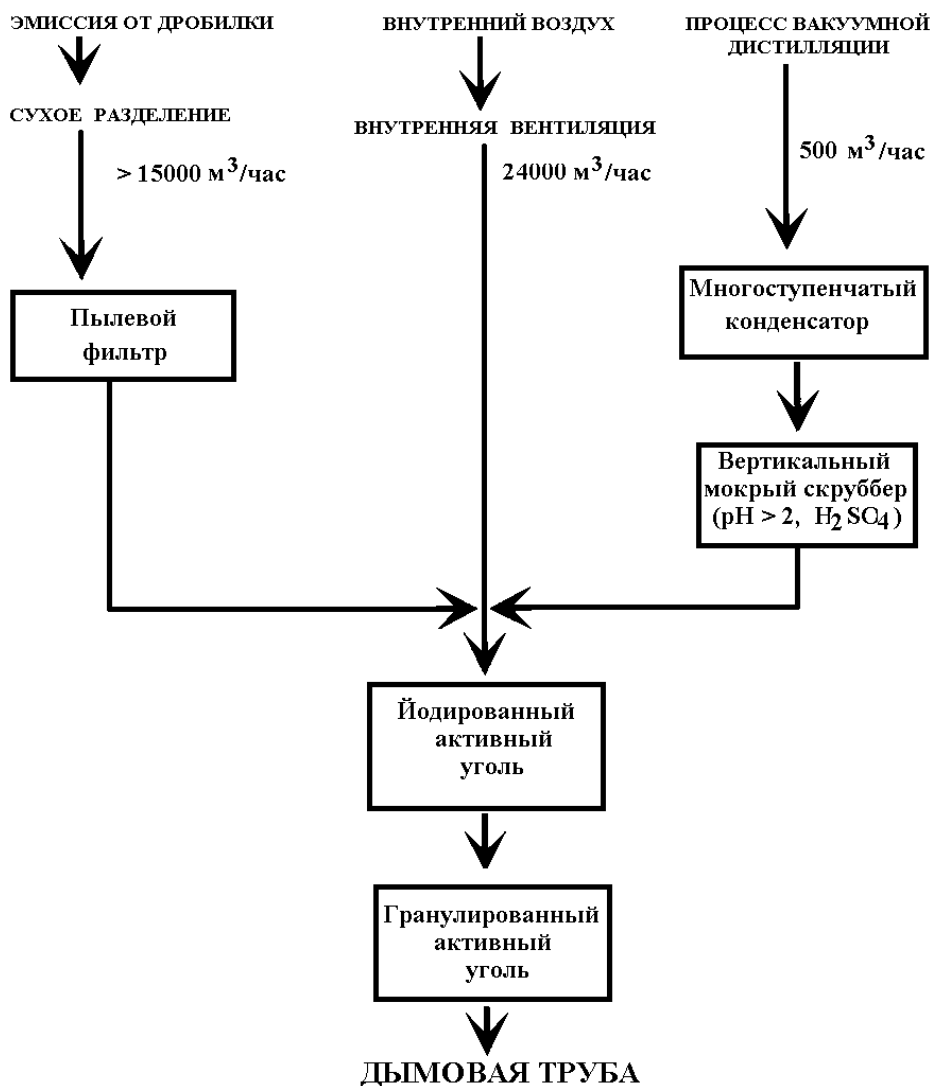


Рис. 6. Схема очистки отходящих газов [32].

Система очистки технологических (сточных) вод состоит из аппаратов сгущения и флокуляции, песчаного фильтра и активных угольных фильтров (рис. 7). Песчаные фильтры удаляют из технологических вод очень тонкие частицы; угольные фильтры абсорбируют содержащиеся в воде органические вещества. Ионообменная обработка завершает очистку сточных вод до требуемых санитарно-гигиеническими нормами уровней. В общем случае в полном технологическом процессе используется примерно 60 м<sup>3</sup> технологической воды. Объем сточных вод, сбрасываемых в канализационную сеть, составляет 10-15 м<sup>3</sup>/час.

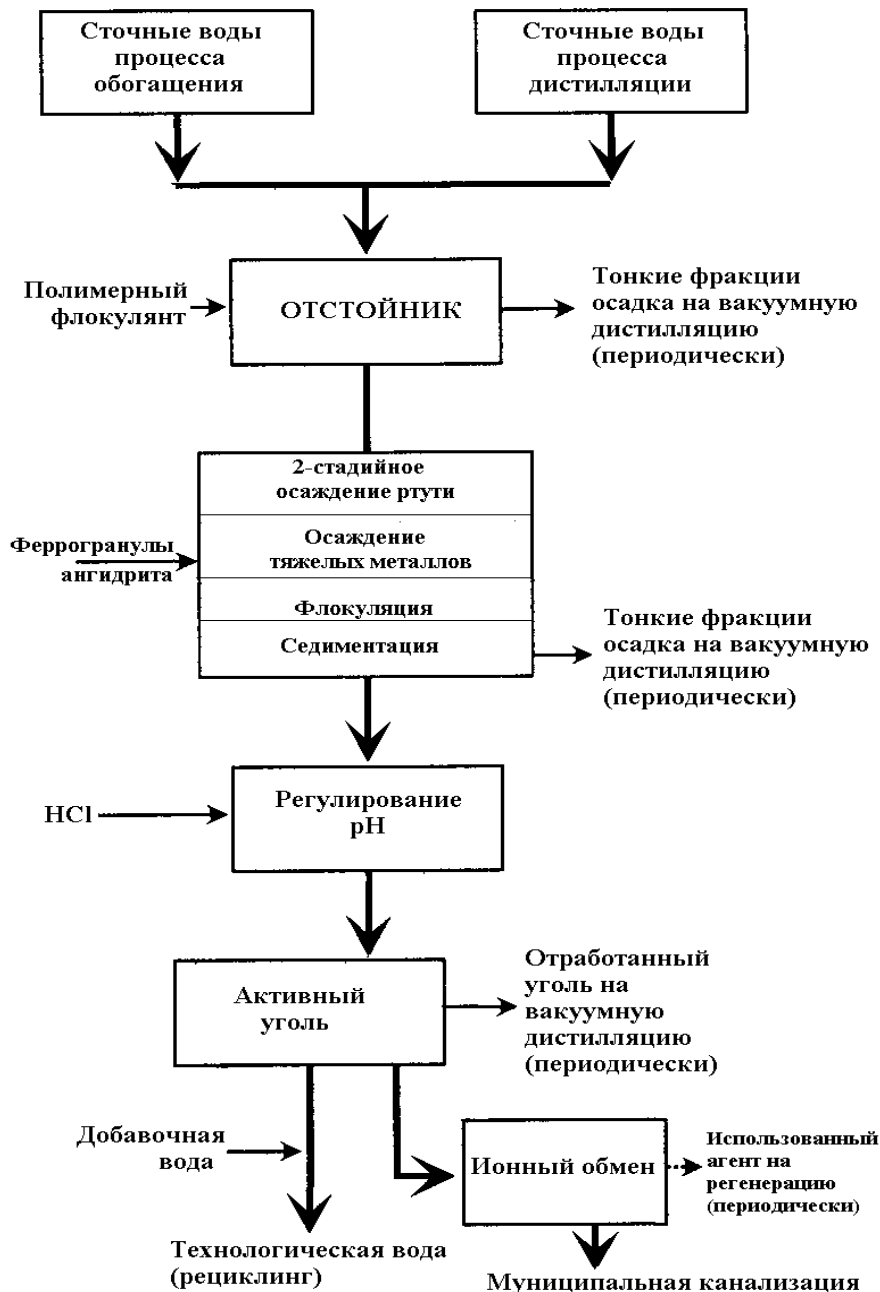


Рис. 7. Схема очистки технологических вод [32].

Мониторинг работы завода Харбауэр показал, что все основные технологические процессы, очистка отходящих сточных вод и технологических газов, эмиссия загрязнителей во

внешнюю среду соответствуют существующим критериям и нормативам. Обработанный материал (остаточный осадок) содержал менее 50 мг/кг ртути, даже если ее пиковые концентрации в перерабатываемых отходах достигали 5000 мг/кг (табл. 3).

Таблица 3. Концентрации ртути в потоках отходов [49]

Устройство	Период	Средняя концентрация ртути в отходах		Критерии обработки
		Поступающие потоки, мг/кг	Обработанные потоки, мг/кг	
Обогащение и вакуумная дистилляция	Сентябрь 1993 – октябрь 1994	Среднее = 500, пиковые уровни свыше 5000	23	50 мг/кг
	Ноябрь 1994 – октябрь 1995		19	
	Ноябрь 1995 – февраль 1996		7,9	
Вакуумная дистилляция	Октябрь 1995 – апрель 1996	-	3,6	
Обработка воды	1993-96	-	в среднем 5 мкг/л	10 мкг/л
Отходящий газ	1993-96	-	в среднем 2,92 мкг/м <sup>3</sup>	50 мкг/м <sup>3</sup>

Сообщается также [34], что при соответствующей конфигурации данного производственного процесса загрязненные ртутью (до 3000 мг/кг) почвы, грунты и строительные отходы могут быть обработаны (демеркуризированы) до уровня содержания остаточной (в обработанном материале) ртути в 2 мг/кг.

#### 4. Цели и итоги демонстрационного проекта

Перед полномасштабным внедрением технологии Харбауэр для ремедиации загрязненных почвогрунтов и строительных отходов в г. Марктредвице был выполнен демонстрационный (пилотный) проект, который преследовал следующие цели [16, 32]:

- установление содержания ртути (с допустимым уровнем в 95%) в отходах (загрязненных почвогрунтах и материалах), подлежащих переработке;
- определение эффективности удаления ртути из перерабатываемых отходов,
- установление уровня ртути в необработанных и обработанных отходах с использованием теста TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure), который представляет собой процедуру определения характеристик токсичности отходов способом выщелачивания (экстрагирования) по установленной методике [61]. TCLP-тест является одним из тестов Агентства по охране окружающей среды США (АООС США), который используется для характеристики токсичности отходов при их возможном захоронении на свалке с точки зрения потенциального выщелачивания (миграции) содержащихся в них поллютантов в подземные воды. Так, согласно требованиям АООС США, если в экстракте из отходов концентрация ртути < 200 мкг/л, то они характеризуются как неопасные и могут размещаться на свалках;
- установление степени очистки отходящих газов и сточных вод;
- определение эффективности извлечения ртути в ходе вакуумной дистилляции.

Пилотный проект был выполнен в ноябре 1994 г. Он осуществлялся в рамках двухстороннего соглашения между АООС США (Программа Суперфонда по развитию инновационных технологий – Superfund Innovative Technology Evaluation) и Министерством исследований и технологий ФРГ. В ходе проекта было установлено, что почвогрунты, подлежащие переработке на оборудовании Харбауэр, содержат большое количество строительных отхо-

дов (например, бетон, кирпич и т. п.), которые отличаются намного более пористой структурой, чем природный гравий, присутствующий в грунтах. Поскольку в порах таких отходов присутствовали относительно высокие количества ртути, то все строительные отходы, почвогрунты и горные породы предварительно дробились. Пилотный проект показал, что максимальная производительность процесса отмывки подготовленного загрязненного материала составляет примерно 20 т/час, дистилляции – 4 т/час, т. е. общая производительность завода лимитируется процессом вакуум-дистилляции. Концентрации ртути в почвах, использованных в пилотном проекте, изменялись от 780 до 1080 мг/кг (средняя 875 мг/кг). Темпы обработки почв в течение демонстрации изменялись от 2,4 до 3,7 т/час. В течение всего пилотного проекта было переработано примерно 63 т загрязненного ртутью материала (общая продолжительность работы оборудования Харбауэр составила 22 часа).

В целом результаты пилотного проекта показали следующее:

- средняя общая концентрация ртути в суглинисто-песчаных и суглинистых почвах была уменьшена в ходе их обработки с 875 мг/кг до менее 20 мг/кг;
- среднее извлечение ртути из загрязненных почвогрунтов составило 97,6-98,0%;
- среднее значение TCLP-теста для ртути уменьшалось с 82 мкг/л (необработанные, загрязненные почвы) до менее 6 мкг/л (обработанные почвы);
- средняя концентрация ртути в отходящих водах, сбрасываемых (после очистки) в муниципальную канализацию, – 5 мкг/л,
- средняя концентрация ртути в отходящих (в атмосферу) технологических газах – 2,92 мкг/м<sup>3</sup>.

Демонстрационный проект доказал эффективность применения технологии Харбауэр для ремедиации загрязненных почвогрунтов, причем не только в отношении ртути (табл. 4). Пилотный проект также показал, что технология Харбауэр применима для обработки разнообразных типов почвогрунтов и строительного мусора, содержащих различные поллютанты, и позволяет извлекать из отходов металлическую ртуть (со степенью ~ 98%).

Таблица 4. Результаты пилотных испытаний по удалению поллютантов из почвогрунтов

Соединение	Загрязненные почвы, мг/кг	Обработанные почвы, мг/кг
ПАУ (сумма 16 соединений)	32000	< 1
Углеводороды	102000	< 10
Цианиды (общее)	1728	< 10
Линдан	3400	0,002
Тринитротолуол	100000	0,4

В ходе демонстрационного проекта были обоснованы критерии очистки (предельные остаточные содержания поллютантов): 50 мг/кг ртути на сухую массу в удаляемых на свалку обработанных почвогрунтах, 1 мг/л мышьяка и 1 мг/л сурьмы в декантированном растворе. Пороговая величина ртути для сбрасываемых в муниципальную канализацию стоков определена в 10 мкг/л, а в отходящих в атмосферу технологических газах в 50 мкг/м<sup>3</sup>.

## 5. План ремедиации участка

В конце 1988 г. был разработан план ремедиации загрязненной ртутью территории, основной целью которого являлось восстановление загрязненного участка с возможностью



его дальнейшего multifunctional использования для нужд города. В общем случае указанный план предусматривал [32, 49]:

- демонтаж технологического оборудования, различных труб, опор трубопроводов и т. п., удаление сильно загрязненного поверхностного слоя кирпичных стен фабричных зданий, сбор и удаление остатков продукции и отходов фабрики, размещение всех материалов (массой около 5000 т) в безопасном месте;

- демонтаж старых фабричных зданий;

- изъятие (экскавация) загрязненных почвогрунтов, забутовки и мусора в среднем до глубины в 4-5 м от поверхности; образованный котлован засыпается чистыми (местными или привозными) грунтами, отвечающими критериям, приведенным в табл. 5.

- переработка загрязненного (> 50 мг/кг ртути) материала на заводе Харбауэр;

- размещение обработанного (очищенного) материала, содержащего < 50 мг/кг ртути, на фабричной свалке; почвы с содержанием ртути < 10 мг/кг используются для засыпки (планировки) котлована, образовавшегося при экскавации (см. табл. 5).

- мероприятия по защите р. Кёсайне, дренирующей загрязненный участок; для предотвращения стока подземных вод в водоток создаются защитный барьер (свайная завеса, «стена в грунте») и специальная насосно-обрабатывающая система; защитный барьер, протяженностью 200 м, будет располагаться на глубине от 7 до 20 м вплоть до нижележащих скальных пород (гнейсов); загрязненные подземные воды, перехватываемые барьером, обрабатываются на местном оборудовании.

Как уже отмечалось, переработка загрязненных ртутью (> 50 мг/кг) почв, строительных отходов и мусора осуществлялась с использованием технологии Харбауэр. Для этого вблизи г. Марктредвица был построен завод Харбауэр (Harbauer soil treatment plant), смонтированный из 60 модулей-контейнеров (3 м шириной, 3 м высотой, 10-14 м длиной) и полностью изолированный от внешней среды (т. е. герметичен), на заводе используется система очистки внутреннего воздуха и шумоподавляющее оборудование [32]. Капитальная стоимость завода Харбауэр составила 45 млн. немецких марок (30 млн. долл. США), ежегодные затраты на обслуживание – 4,8 млн. марок (3,2 млн. долл.), стоимость переработки – 480 нем. марок (примерно 320 долл.) за 1 т отходов, мощность – 35 тыс. т отходов в год.

Таблица 5. Допустимые содержания поллютантов в почвогрунтах, используемых для планировки местности или размещаемых на фабричной свалке

Параметры	Планировка территории	Размещение на свалке *
	Почвы, мг/кг	
Ртуть (валовое содержание)	≤ 10	≤ 50
	Экстракты из почв, мг/л **	
pH	Не нормируется	6,5-9,5
Ртуть	0,004	0,1
Свинец	0,16	2,0
Мышьяк	0,04	Не нормируется
Сурьма	0,04	Не нормируется
Мышьяк + сурьма	Не нормируется	1,0
Кадмий	0,02	0,5
Никель	0,2	2,00
Хром (VI)	0,2	0,5
Медь	Не нормируется	1,0
Растворенный органический углерод	Не нормируется	< 200

\* Материал, в котором содержания превышают указанные величины, перерабатывается на заводе Харбауэр.

\*\* The German DIN 38414-S4 Leachability Test.

## 6. Общий ход выполнения работ по ремедиации территории

Ремедиация загрязненной ртутью территории в г. Марктредвице включала две группы мероприятий: так называемые основные мероприятия и дополнительные мероприятия [42].

Основные мероприятия проводились в несколько самостоятельных фаз:

1. Первичные срочные меры (1985-1987 гг.), которые включали работы по расчистке промышленной зоны (сбор и удаление мусора, производственных отходов, остатков сырья и др.). Стоимость работ составила около 4,5 млн. немецких марок.

2. Дальнейшие срочные меры (1986-1991 гг.), в ходе которых осуществлялся демонтаж фабричного оборудования, дымовой трубы, удаление загрязненной штукатурки. Стоимость работ – около 34 млн. марок. В ходе этих мероприятий образовалось примерно 5000 т различных отходов (включая верхние слои кирпичей и остатки продукции фабрики) с высоким содержанием ртути. Отходы демонтажа, содержащие более 50 мг/кг ртути, перерабатывались на заводе Харбауэр.

3. Мероприятия по защите р. Кёсайне (1987-1996 гг.), заключающиеся в создании 200-метровой стены-барьера для изолирования водотока от воздействия грунтовых вод с территории загрязненного участка. Стоимость работ – около 8 млн. марок. Подземные воды участка загрязнены ртутью, ароматическими, хлорированными и нефтяными углеводородами. Масштабы загрязнения подземных вод были исследованы в 1992 г. и их результаты использовались для проектирования общепринятой системы откачивания и обработки. Очистка грунтовых вод, все еще продолжающаяся, включает осаждение, флокуляцию, седиментацию, ионный обмен и доочистку активированным углем.

4. Дополнительное опробование и оценка масштабов загрязнения строительных конструкций и почвогрунтов с целью выбора способа их утилизации (1990-1993 гг.). Рассматривались два варианта: а) переработка на заводе Харбауэр и б) размещение («монопонирувание») на свалке. Так, почвогрунты и прочие отходы с содержанием ртути > 50 мг/кг перерабатываются по технологии Харбауэр до остаточных концентраций металла порядка 20 мг/кг. Отходы, включая определенное количество переработанного материала, с содержанием ртути < 50 мг/кг (в порядке согласованного исключения до 100 мг/кг) размещаются на специальной свалке.

5. Демонтаж основных строительных конструкций (фабричных строений), который завершился в марте 1993 г. Образующиеся отходы разделялись на две группы – с содержанием ртути меньше и больше 50 мг/кг. Стоимость работ составила около 24,5 млн. марок.

6. Эскавация (выемка) почвогрунтов, забутовки, строительного мусора и т. п. в пределах загрязненной зоны (до средней глубины в 4 м). В ходе эскавации изъятый материал (от 250 до 300 т в день) разделялся на остатки фундамента, остатки тротуара, насыпные (техногенные) почвогрунты, суглинистые почвы, гравий и т. д. и складировался в штабеля для соответствующего описания и определения содержания ртути и других поллютантов, а затем (в зависимости от степени загрязнения) транспортировался к местам назначения (на заводскую свалку или на завод Харбауэр). Общая стоимость работ составила ~ 76 млн. марок.

В ходе работ были изъяты более 100 тыс. т загрязненных отходов (почвогрунтов и др.), из которых в период с августа 1993 г. по июнь 1996 г. порядка 56-57 тыс. т (с содержанием ртути >50 мг/кг) переработаны на заводе Харбауэр [18, 46, 48, 51]. Отходы доставлялись на завод в герметичных контейнерах (емкость одного контейнера ~ 15 т), где из них было получено 30 т металлической ртути. Для размещения (захоронения) отходов (включая опре-

деленное количество переработанного, т. е. демеркуризованного, материала) с содержанием ртути менее 50 мг/кг (в порядке согласованного исключения до 100 мг/кг) недалеко от г. Марктредвица, в местечке Вёслау, в 1992 г. была создана специальная свалка с гидроизоляцией ложа и изолирующим перекрытием (при организации свалки использовались геотекстиль и другие специальные материалы). Емкость свалки – 145 тыс. м<sup>3</sup>. Всего на свалке было размещено 92 тыс. т материала (стоимость размещения – около 60 марок за 1 т). Почвогрунты и другие отходы, содержащие от 10 до 50 мг/кг ртути, использовались для засыпки на свалке в Вёслау. Грунты с содержанием ртути менее 10 мг/кг складировались и использовались для засыпки образовавшегося котлована или для захоронения совместно с переработанным (на заводе Харбауэр) материалом. По данным [31], на свалку в Вёслау было вывезено 20 тыс. т слабо загрязненного материала, по данным [46], около 36 тыс. т. Есть сведения, что слабозагрязненные грунты частично были также размещены в окрестностях г. Марктредвица в других местах [20]. Необходимо отметить, что в ходе исследований загрязненной территории были выявлены участки с радиоактивным загрязнением («HOT spots»), загрязненный материал помещен в специальные контейнеры или барабаны, которые затем размещались в калийных шахтах [20].

В ходе дополнительных мероприятий были выполнены следующие работы [42]:

1. Санация вокруг химической фабрики (стоимость работ около 10 млн. марок).
2. Санация 34 частных придомовых участков (садов), расположенных вблизи химической фабрики и интенсивно загрязненных ртутью. Очистке подвергались участки с содержанием ртути в почвах более 33 мг/кг.

3. Санация водных объектов, основанная на удалении загрязненных ртутью донных отложений (шлама, ила) из водотоков Кёссайе и Рёслау. Эти работы, начавшиеся в 1994 г., включали удаление загрязненных отложений из водотоков откачиванием с использованием вакуумной технологии и путем экскавации [18, 39]. Необходимо отметить, что хотя значительная часть загрязненного ила из русла водотоков была удалена, но, тем не менее, работы последних лет указывают на повышенные уровни ртути в речных рыбах (форели, окуне, угре), отловленных в р. Кёссайне и р. Эгер (в некоторых экземплярах до 1-3 мг/кг) [50]. Очевидно, что в водотоках сохранились участки с достаточно высоким содержанием ртути в донных отложениях (в техногенных илах), играющих роль вторичного источника загрязнения водной фазы и гидробионтов.

4. Полный демонтаж всей территории «внутреннего города», который начался после июня 1996 г. и завершился в середине 1997 г. (стоимость демонтажа составила около 28 млн. марок).

Все мероприятия по ремедиации сопровождалось производственным экологическим контролем (по специально разработанным программам), включая контроль содержания ртути в атмосферном воздухе во время демонтажа зданий (в некоторых случаях фиксировалась повышенная эмиссия ртути), при переработке отходов и размещении их на свалке и т. д. В 1992 г. немецкий Институт экологической химии осуществил специальный проект «Standortgerechte Bewertung der Belastung im Umfeld der Chemischen Fabrik Marktrechwitz» («Оценка нагрузки на окружающую среду в районе химической фабрики в Марктредвице»), в ходе которого были установлены следующие контрольные (с точки зрения риска для здоровья людей) уровни ртути в почвах: 33 мг/кг сухой массы – нет риска (как отмечено выше, именно этот уровень использовался как нормативный при санации придомовых участков), более 33 мг/кг – возникновение риска, причем концентрация в 78 мг/кг отвечает умеренному (среднему) риску, в 127 мг/кг – высокому риску, в 176 мг/кг – опасному риску [42].

Осенью 1996 г. работы по ремедиации территории бывшей химической фабрики были практически полностью завершены [20, 42, 46, 64]. Общая стоимость ремедиации в доступных источниках оценивается несколько по-разному. Так, согласно [42, 46], она составила около 175 млн. нем. марок (115 млн. долл. США), по данным [16, 26], 150 млн. нем. марок, по недавним сведениям [33], общая стоимость ремедиации центральной части г. Марктервица составила 95,1 млн. евро (Земля Бавария внесла 89,3 млн. евро, район Вунзидель – 3,1 млн. евро, г. Марктредвиц – 2,7 млн. евро). По данным [54], всего на исследование масштабов и интенсивности ртутного загрязнения, на работы по ремедиации (включая планирование и мониторинг) территории химической фабрики и примыкающей фирмы «Stella GmbH» было истрчено около 160 млн. нем. марок, из них в 1992-1996 гг. на основную санацию (включая устранение отходов и загрязненных почв) – 30-50 млн. марок.

Параллельно с проведением ремедиации территории внутреннего города разрабатывался план ее будущего (многофункционального) использования [17, 39, 62, 64]. В настоящее время здесь размещены объекты торговли, крытая автостоянка, досуговые учреждения, представительство геологической службы, большой торговый центр (Kösseine-Einkaufs-Centrum) с рестораном «Кёссайне» и др.

## Заключение

Опыт ремедиации интенсивно загрязненной ртутью территории в г. Марктредвице, включающей демонтаж загрязненных строительных конструкций и промышленного оборудования, изъятие (экскавацию) почвогрунтов, их сортировку по интенсивности загрязнения, захоронение на специальной свалке и переработку (с получением металлической ртути) на созданном для этих целей заводе, очистку водотоков и подземных вод, общую санацию территории и подготовку ее к дальнейшему multifunctional использованию в интересах города, свидетельствует об эффективности использованных подходов и технологий.

Технология Харбауэр, используемая для переработки ртутьсодержащих отходов, включает просеивание и дробление почвы до частиц диаметром менее 60 мм; смешивание почвы с водой в двухлопастном промывателе; разделение почвы на относительно чистую грубую фракцию (диаметром от 2 до 60 мм) с содержанием ртути менее 50 мг/кг, на сильно загрязненную тонкую фракцию (менее 2 мм) с содержанием ртути более 50 мг/кг и на «пустую» (всплывающую) фракцию. Тонкая (менее 2 мм) загрязненная фракция почвы, которая получается в ходе промывки, перерабатывалась в устройстве вакуумной дистилляции путем ее нагревания примерно до 380<sup>0</sup>С при пониженном давлении (100-200 гектапаскаль), что снижает точку кипения ртути, увеличивает эффективность удаления ртути из почвы и уменьшает потребление энергии. Отходящий газ конденсируется в холодильнике для выделения ртути. Технологические воды и отходящие газы обрабатываются в специальных системах очистки. Мощность установки по водной классификации составляет 20-25 т/час (примерно 35 тыс. т/год), модуля вакуумной дистилляции – 4 т/час, удельная стоимость очистки – 400-500 немецких марок за 1 т отходов (в среднем 480 марок/т).

В ходе ремедиации на заводе Харбауэр, специально созданном для этих целей, было переработано 56-57 тыс. т ртутьсодержащих отходов с содержанием ртути от 50 до 5000 мг/кг (при средних темпах 150 т/день) и получено (регенерировано) около 30 т металлической ртути. Средние концентрации ртути с 875 мг/кг (в загрязненных почвогрунтах и других отходах) были снижены до менее чем 18 мг/кг (в обработанном материале), что позволило

разместить его на специальной свалке. Среднее общее удаление ртути из загрязненных почвогрунтов составило 98-99%. Характеристика токсичности отходов по TCLP-тесту для ртути была снижена с 82 мкг/л (для необработанных материалов) до 6 мкг/л (в остаточном материале), т. е. более чем на порядок. Средняя концентрация ртути в очищенных сточных водах завода Харбауэр, сбрасываемых в муниципальную канализацию, составила 5 мкг/л, а средняя концентрация ртути в отходящих (дымовых) газах, выбрасываемых в атмосферу, – 2,92 мкг/м<sup>3</sup>, что соответствует нормативам.

Безусловно, рассмотренный опыт ремедиации в г. Марктредвице может использоваться при разработке и практическом осуществлении аналогичных проектов в российских городах и промышленных центрах.

## Литература

1. Бессонов В.В., Янин Е.П. Демеркуризация городских почв и грунтов: проблемы и способы // Доклады III Международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде» (7-9 октября 2004 г.). Том 2. – Семипалатинск, 2004, с. 469-475.
2. Бессонов В.В., Янин Е.П. Современные подходы к демеркуризации городских почв и грунтов // Прикладная геохимия. Вып. 6. Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. – М.: ИМГРЭ, 2004, с. 313-324.
3. Бессонов В.В., Янин Е.П. Эмиссия ртути в окружающую среду при производстве газоразрядных ламп в России. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 59 с.
4. Бессонов В.В., Янин Е.П. Ртутьсодержащие приборы и устройства: экологические аспекты производства и использования. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 52 с.
5. Бессонов В.В., Янин Е.П. Способы оценки и ремедиации загрязненных ртутью городских почв // Ртуть. Проблемы геохимии, экологии, аналитики. – М.: ИМГРЭ, 2005, с. 160-180.
6. Лассен К., Трегер Ю., Янин Е. и др. Оценка поступлений ртути в окружающую среду с территории Российской Федерации. Подготовлено для Совета стран Арктики. План действий Совета стран Арктики по предотвращению загрязнения Арктики. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ, Датское агентство по охране окружающей среды. 2005 // <http://www.mst.dk/udgiv/Publications/2005/87-7614-541-7/pdf/87-7614-542-5.PDF>.
7. Ртуть. Проблемы геохимии, экологии, аналитики / Отв. ред. А.Г. Волосов. – М.: ИМГРЭ, 2005. – 191 с.
8. Эколого-геохимические проблемы ртути / Отв. ред. Э.К. Буренков, Е.П. Янин. – М.: ИМГРЭ, 2000. – 180 с.
9. Ягольницер М.А., Соколов В.М., Рябцев А.Д. и др. Оценка промышленной эмиссии ртути в Сибири // Химия в интересах устойчивого развития, 1995, № 1-2, с. 23-35.
10. Янин Е.П. Ртуть в окружающей среде промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.
11. Янин Е.П. Добыча и производство ртути в СНГ как источник загрязнения окружающей среды // Эколого-геохимические проблемы ртути. – М.: ИМГРЭ, 2000, с. 38-59.
12. Янин Е.П. Деконтаминация городских почв, загрязненных тяжелыми металлами (проблемы, состояние, методы) // Ресурсосберегающие технологии, 2002, № 20, с. 3-49.

13. Янин Е.П. Ртуть в России: производство и потребление. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 38 с.
14. Янин Е.П. Организационно-правовые аспекты очистки загрязненных городских почв (зарубежный опыт) // Прикладная геохимия. Вып. 6. Экологическая геохимия Москвы и Подмосковья. – М.: ИМГРЭ, 2004, с. 286-312.
15. Янин Е.П. Эмиссия ртути в окружающую среду предприятиями цветной металлургии России // Экологическая экспертиза, 2004, № 5, с. 41-101.
16. Assessment of implementation of PARCOM Recommendation 89/3 on Programmes and Measures for Reducing Mercury Discharges from Various Sources. OSPAR Commission. 2002.
17. BAUKULTUR IN STÄDTEN UND GEMEINDEN. Eine Projektsammlung // <http://www.bmvbs.de/architektur-baukultur/download/Dokumentation0304.pdf>.
18. Burri S., Müller M., Höltschi D., Arx von J. Quecksilber (Hg). Kreislauf Kontamination und Toxizität Fallbeispiele: Marktredwitz - Camp Far West Reservoir. Bodenseminar Ch. Alewell, P. Huggenberger, Wintersemester 04/05, Umweltgeowissenschaften, Uni Basel // [http://pages.unibas.ch/environment/Studium/Lect\\_WS0405/Bodensanierung/referate/Quecksilber.pdf](http://pages.unibas.ch/environment/Studium/Lect_WS0405/Bodensanierung/referate/Quecksilber.pdf).
19. Contaminants and Remedial Options at Selected Metal-Contaminated Sites. EPA/540/R-95/512, July 1995 // <http://nepis.epa.gov>.
20. Deinzer D., Sebald R., Kaus R. The successful rehabilitation of the highly Hg-contaminated site of the former «Chemische Fabrik Marktredwitz» CFM // [http://lims.uni-duisburg.de/Tagungen/Cemsa98/p\\_14.htm](http://lims.uni-duisburg.de/Tagungen/Cemsa98/p_14.htm).
21. Dermont G., Bergeron N., Mercier G., Richer-Lafèche M. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications // J. Hazard. Mater., 2008, 152, № 1, p. 1-31.
22. DER SPIEGEL 29/1985 vom 15.07.1985, Seite 14d-15a // <http://wissen.spiegel.de>.
23. DER SPIEGEL 48/1988 vom 28.11.1988, Seite 81-88 // <http://wissen.spiegel.de/>
24. DER SPIEGEL 18/1990 vom 30.04.1990, Seite 119-125 // <http://wissen.spiegel.de>.
25. Einsatz der Vakuumdestillation bei der Reinigung... // <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de>.
26. Einsatz der Vakuumdestillation bei der Reinigung kontaminierter Böden // [http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/Alfaweb/print/s\\_vkd.pdf](http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/Alfaweb/print/s_vkd.pdf).
27. Engineering Bulletin: Soil Washing Treatment. EPA/540/2-90/017, September 1990 // <http://nepis.epa.gov>.
28. Groschel W. Cleaning of mercury-Contaminated Soil Using a Combined Washing and Distillation Process // <http://www.nato.int/ccms/s13/report/intrm13.html>.
29. Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA: Soil Washing. Interim Guidance. EPA/540/2-91/020A. September 1991.
30. Harbauer GmbH & Co KG // <http://www.harbauer-berlin.de>.
31. Harbauer soil mercury clean-up plant // <http://www.highbeam.com/doc/1G1-4426568.html>.
32. Harbauer Soil Washing/Vacuum-Distillation System, Harbauer GmbH & Company KG Facility, Marktredwitz, Germany. EPA - BMBF Bilateral Site Demonstration Innovative Technology Evaluation Report. U.S. EPA Superfund Innovative Technology Evaluation Program, EPA Contract No. 68-C5-0037. Work Assignment No. 0-5, 1996. - 110 pp. // <http://www.epa.gov/ord/SITE/bilateral/harbauer.pdf>.
33. Haut T. Altlastenmanagement in Bayern // [www.altlasten-bayern.de](http://www.altlasten-bayern.de).

34. *Hempel M., Thoeming J.* Remediation techniques for Hg-contaminated sites // . Mercury Contaminated Sites. Characterization, Risk Assessment and Remediation. – Berlin etc.: Springer-Verlag, 1999, p. 113-130.
35. *Hempel M., Wilken R.-D., Miess R. et al.* Mercury contaminated sites – behaviour of mercury and its species in lysimeter experiments // *Water, Air, and Soil Pollut.*, 1995, v. 80, p. 1089-1098.
36. *Hintelmann H., Hempel M., Wilken R.-D.* Observation of unusual organic mercury species in soils and sediments of industrially contaminated sites // *Environ. Sci. and Technol.*, 1995, 29, № 7, p. 1845-1850.
37. Innovative Site Remediation Technology. Soil Washing/Soil Flushing. Vol. 3. EPA 542-B-93-012. November 1993.
38. IRIS Biotech GmbH // <http://www.cfmot.de>.
39. Quecksilber // [http://pages.unibas.ch/environment/Studium/Lect\\_WS0405/Bodensanierung/Hg-Praesentation.pdf](http://pages.unibas.ch/environment/Studium/Lect_WS0405/Bodensanierung/Hg-Praesentation.pdf).
40. Quecksilber in Marktredwitz – 14.04.88 // <http://video.google.de/videoplay?docid=-3459965386023926108>.
41. Quecksilber und seine Verbindungen // [http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volitexte/1998/10/html/2\\_allgemein.pdf](http://www.sub.uni-hamburg.de/opus/volitexte/1998/10/html/2_allgemein.pdf).
42. *Kolb K.* Erfolgreiche Sanierung der Chemischen Fabrik Marktredwitz // [http://www.abfallratgeber-bayern.de/arpa/allglfu.nsf/lfuview2\\_n?openform&SELV=\\_Gesamtverzeichnis&PARA=\\_all](http://www.abfallratgeber-bayern.de/arpa/allglfu.nsf/lfuview2_n?openform&SELV=_Gesamtverzeichnis&PARA=_all).
43. KRAFT DER LANDSCHAFT // <http://www.tibay-m.de/fotoausstellung/wasserwerk-skalka.html>.
44. *Kružiková K., Svobodová Z., Valentová O. et al.* Mercury and Methylmercury in Muscle Tissue of Chub from the Elbe River main tributaries // *Czech. J. Food Sci.*, 2008, 26, № 1, p. 65-70.
45. *Mann M.J.* Full-scale and pilot-scale soil washing // *J. Hazard. Mater.*, 1999, v. 66, № 1-2, p. 119-136.
46. Marktredwitz clean-up completed // <http://www.highbeam.com/doc/1G1-47006470.html>.
47. *Maršálek P., Svobodová Z., Randák T., Švehla J.* Mercury and methylmercury contamination in fish from the Skalka reservoir: A case study // *Acta Veterinaria Brno*, 2005, v. 74, p. 427-434.
48. Mercury cleanup in Germany holds global lessons // [http://www.golder.com/archive/TechSpeak/TS\\_68/07.html](http://www.golder.com/archive/TechSpeak/TS_68/07.html).
49. NATO/CCMS Pilot Study. Evaluation of Demonstrated and Emerging Technologies for the Treatment and Clean Up of Contaminated Land and Groundwater (Phase II). 1998. Final Report. Number 219. – EPA/542/R-98/001a, June 1998 // [www.clu-in.com](http://www.clu-in.com).
50. Noch immer Quecksilber im Fisch. Erschienen im Ressort Marktredwitz am 27.09.2007 // [http://www.frankenpost.de/\\_/tools/pdfpage.html?arid=717996](http://www.frankenpost.de/_/tools/pdfpage.html?arid=717996).
51. OGV – Tagungen: 1998 Marktredwitz // <http://www.ogv-online.de/Tagungen/1998/marktredwitz98.html>.
52. *Richter R.B., Stapelfeldt F., Flachberger H., Araujo D. M.* Physikalisch-chemische und biologische Verfahren zur Behandlung quecksilberkontaminierter mineralischer Abfälle // [http://altlastendigital.de/aid/alts\\_20080303/inhalt.html](http://altlastendigital.de/aid/alts_20080303/inhalt.html).
53. *Rupper H.* von Natürliche Spurenmetallgehalte im Boben und ihre anthropogene Überprägung // *Mitt. österr. Geol. Ges.*, 1990, 83, S. 243-265.

54. Rückbau und Bodensanierung Ehemalige Chemische Fabrik Marktredwitz (CFM) und Stella-Gelände // <http://www.ibpedall.de/docs/ReferenzChemischeFabrikMarktredwitz.pdf>.
55. Skalka-, Římov-, Lučina Water Reservoirs. Research Institute of Fishing and Hydrobiology // <http://www.uhul.cz/mcl/mon96eng/fishing.php>.
56. Skovorodá Z., Hejtmánek M. Total mercury content in the musculature of fishes from the river Ohre and its tributaries // *Acta Veterinaria Brno*, 1976, v. 45, p. 45-49.
57. Schleifscheibenfabrik (Marktredwitz) // <http://www.altlasten-bayern.de/default.asp?ShowProjekt=192&Menue=14>.
58. Stadtgebiet // [http://marktredwitz.de/21\\_Stadtgeschichte.html](http://marktredwitz.de/21_Stadtgeschichte.html).
59. Stadt Marktredwitz. Geschichte und Entwicklung // *Oberfranken Kurier*, Dezember 2004 // [www.oberfranken-kurier.de](http://www.oberfranken-kurier.de).
60. Superfund treatability cleanringhouse. Summary report «Harbauer Soil Cleaning System. Received at US EPA Headquarters on November 20, 1987. EPA/540/2-89/012 // <http://nepis.epa.gov>.
61. Toxicity Characteristic Leaching Procedure... // <http://www.epa.gov>.
62. Von der Industriebrache zur lebendigen Innenstadt: zum Beispiel Marktredwitz. Städtebauförderung in Bayern. Themenheft 16. Oktober 2002 // [http://www.stmi.bayern.de/imperia/md/content/stmi/bauen/staedtebaufoerderung/veroeffentlichung/themenheft\\_16.pdf](http://www.stmi.bayern.de/imperia/md/content/stmi/bauen/staedtebaufoerderung/veroeffentlichung/themenheft_16.pdf).
63. Wilichowski M. Remediation of soils by washing processes: an historical overview // <http://lqma.ifas.ufl.edu/SEED/SOS6262/pdf/Stemann-27.pdf>.
64. Wittmann M. Von Industriebrache zur Vitalen Innenstadt am Beispiel Marktredwitz // <http://www.stmugv.bayern.de/umwelt/boden/download/doc/29.pdf>.