

**Янин Е.П. Сжигание осадков городских сточных вод (проблемы и способы) // Ресурсосберегающие технологии, 2006, № 24, с. 3–29.**

В настоящее время сжигание рассматривается в качестве одного из основных альтернативных способов уничтожения отходов, характеризующихся высокими содержаниями органических веществ. Основное преимущество сжигания таких отходов заключается в значительном снижении их массы (примерно на 75%) и объема (до 90%), что особенно важно в условиях дефицита свободных площадей для организации полигонов и свалок. При сжигании разлагаются многие опасные органические соединения, а использование образующейся теплоты для производства электроэнергии и золошлаковых остатков для производства некоторых материалов может частично возместить затраты на переработку отходов. Некоторые специалисты считают, что сжигание является практически единственным реальным способом решения такой важнейшей экологической, санитарной и социальной проблемы, как избавление от отходов.

В городах одним из наиболее объемных видов отходов являются осадки сточных вод (ОСВ), образующиеся на городских очистных сооружениях, где, как правило, осуществляется совместная очистка бытовых и промышленных стоков [7, 16, 23, 26, 30, 32]. В большинстве случаев эти отходы относятся к третьему классу биотоплив, имеющих крайне низкую энергетическую ценность. Тем не менее некоторые виды ОСВ, подсушенные до влажности менее 10%, характеризуются теплотой сгорания, сопоставимой с теплотой сгорания бурого угля (порядка 3700 ккал/кг), и поэтому могут сжигаться с получением энергии [13], а при правильной организации этого процесса и надежной очистке отходящих газов можно существенно сократить выбросы поллютантов и снизить экологические риски до минимума [54, 65].

В то же время существует точка зрения, что сжигание ОСВ является заметным локальным источником поступления различных поллютантов в окружающую среду [59], а его применение оправдано лишь в том случае, когда ни один другой более эффективный способ утилизации ОСВ не может быть использован [7]. Согласно [19], сжигание экологически оправдано только на крупных очистных станциях при дефиците земельных участков для почвенного удаления ОСВ или при их совместном сжигании с мусором на единой установке. К недостаткам сжигания относят также высокие капитальные затраты, относительно высокие эксплуатационные расходы и повышенные требования к квалификации обслуживающего персонала.

#### Общие подходы к сжиганию ОСВ

В ряде стран сжигание ОСВ занимает заметную долю в их утилизации и переработке. Например, во второй половине 1980-х гг. в ФРГ ежегодное образование ОСВ (на сухое вещество) составляло около 2,5 млн. т (в 1983 г. – около 1,8 млн. т) [18]), из которых сжигалось (на 41 инсинераторе) около 9% [12, 63]. В начале 1990-х гг. в Германии сжигалось 10% из ежегодно образующихся ОСВ [62]. При этом сжигание 1 т ОСВ (на сухое вещество) обходилось (с учетом предварительного обезвоживания и последующего депонирования золы) в 600-900 марок, размещение на сельскохозяйственных угодьях – от 0 до 300 марок, депонирование (с предварительным обезвоживанием до 35%) – от 400 до 1200 марок. По данным [66], в 1991 г. стоимость сжигания 1 т ОСВ (на сухую массу) в ФРГ составляла 900-2000 марок (с предварительным обезвоживанием, сушкой, а также складированием остатков сжигания и частичным вторичным использованием золы). Компостирование ОСВ без дополнительной обработки обходилось в 150-400 марок, с дополнительной обработкой – в 200-600 марок. В начале XXI в. в ФРГ из 2,7 млн. т ОСВ (на сухое вещество), ежегодно образующихся при очистке сточных вод, сжигалось уже около 20% [58]. В США в конце 1990-х гг. на 200 инсинера-

торных установках перерабатывалось порядка 25% от ежегодного количества ОСВ [63]. Очень велика доля сжигаемых ОСВ в Японии [24]. В Швеции в начале 1980-х гг. ежегодно образовывалось около 2,5 млн. м<sup>3</sup> ОСВ, из которых 30% подвергались обезвоживанию, после чего частично складировались, частично утилизируются путем сжигания [39]. В Великобритании в 1990 г. масса ОСВ г. составила 1107 тыс. т (по сухому веществу), из которых 77 тыс. т было сожжено. Прогнозировалось, что в 1999 г. в стране образуется 1746 тыс. т ОСВ (на сухую массу), из которых около 21-22% будет сжигаться [55]. Сжигание ОСВ осуществляется на крупных станциях очистки сточных вод во Франции. Например, на станции Валентон, которая обеспечивает очистку стоков 110 коммун в районе Парижа, сжигаются осадки сточных вод и избыточный активный ил после обработки в метантенках, причем использование биогаза для получения электроэнергии и тепла от сжигания дают заметный экономический эффект [44]. В Гонконге сжиганию подлежат в основном токсичные шламы, размещение которых в окружающей среде представляет опасность [46]. Однако при этом возникает проблема загрязнения атмосферы отходящими газами, содержащих пыль и токсичные вещества. Капитальные затраты на системы сжигания производительностью 200 и 280 т/сут составили 90 и 130 млн. гонконгских долл. соответственно (это не уступает затратам, связанным с захоронением шламов). Авторы цитируемой работы считают, что при выборе систем утилизации ОСВ более корректно ориентироваться на экологические и социальные факторы, нежели на денежные затраты.

Сжигание ОСВ представляет собой процесс окисления их органической части при повышенной температуре до нетоксичных газов (диоксида углерода, водяных паров, азота) и выделения минеральной части в виде расплава или золы [26]. С технологической точки зрения сжигание представляет собой способ обезвреживания ОСВ с одновременным использованием последних в качестве топлива и утилизацией выделившейся теплоты, а в ряде случаев и образовавшейся золы в технологической схеме обработки осадков. В частности, теплота используется для подогрева воздуха, необходимого для сжигания, а зола – как присадочный материал для интенсификации процесса обезвоживания ОСВ на вакуум-фильтрах или фильтр-прессах.

Степень пригодности ОСВ для сжигания и получения тепловой энергии зависит главным образом от содержания в них органических веществ и влажности. При анализе экономичности способа сжигания ОСВ обычно исходят из того, что этот результат в промышленных условиях может быть достигнут при концентрациях твердых веществ в осадке не ниже 40%, т. е. при уменьшении его влажности до 60% (при условии хорошей водоотдачи и незначительных затратах на предварительное обезвоживание и сушку ОСВ) [7]. В частности, расчеты, выполненные в СССР в конце 1980-х гг. специалистами «Энергобумпром» на основе материального и теплового балансов, свидетельствуют о том, что в реальных условиях теплотери, связанные с предварительной сушкой осадков, на 30% больше получаемого тепла при их сжигании. Кроме того, горению обезвоженных осадков всегда предшествует эндотермический процесс их тепловой подготовки, включающий прогрев материала, испарение влаги и выделение летучих компонентов. Затраты теплоты на этот процесс достаточно велики и в ряде случаев могут превышать количество теплоты, выделяющейся при сгорании ОСВ, т. е. для сжигания может потребоваться дополнительное количество топлива [26].

В любом случае перед сжиганием ОСВ подвергаются обработке, которая включает удаление песка, добавление присадок, сгущение, установление требуемого состава и удаление воды (обезвоживание) [1, 8, 37]. Песок необходимо удалять для того, чтобы предохранить технологическое оборудование от износа. Кроме того, благодаря этой процедуре повышается теплота сгорания осадка из-за увеличения содержания летучих соединений. Сгущение ОСВ, которое сопровождается обычно такими процессами, как гравитационное отстаивание, всплывание или центрифугирование, предназначено в первую очередь для уменьшения объема осадка, который подлежит обработке. Воду из ОСВ удаляют при помощи центрифугирования, вакуумной фильтрации, фильтрации под давлением,

отжима, иногда с применением микрофльтрации в поперечном потоке и электрообезвоживания. Уменьшение количества поверхностной и связанной воды в ОСВ осуществляется путем их тепловой и химической обработки, что позволяет сократить содержание влаги в осадке на 75%. При использовании химических (в основном полимерных) веществ на предварительных этапах обработки увеличивается общая масса осадка более чем на 10%, а поскольку эти химические составляющие инертны, то общая теплота сгорания осадка соответственно снижается. В Японии с начала 1990-х гг. наиболее распространенным способом обезвоживания ОСВ с превращением их в кек с влажностью до 70% является коагуляция (с применением неорганических или полимерных коагулянтов) в сочетании с центрифугированием или фильтрованием под давлением (Ито, Такэути, 1991). Для этих целей японской фирмой «Итикава кэори» разработаны специальные полимерные коагулянты и ленточные фильтр-прессы.

Для обеззараживания и снижения массы и объема ОСВ, предварительно обезвоженных на вакуум-фильтрах, фильтр-прессах или центрифугах, ленточных фильтр-прессах непрерывного действия, применяют термическую сушку [3, 21, 25, 26]. Термическая сушка осадка производится на сушильных установках, состоящих из сушильного аппарата (сушилки) и вспомогательного оборудования (топки, подогреватели-теплообменники, питатели, циклоны, скрубберы, дутьевые устройства, контейнеры и бункеры). Среди способов сушки преобладает конвективный способ, при котором необходимая для испарения тепловая энергия непосредственно передается осадку теплоносителем — сушильным агентом, в качестве которого могут использоваться топочные газы, перегретый пар или горячий воздух. В практике термической сушки ОСВ наибольшее распространение получил способ сушки топочными газами. Независимо от вида применяемого сушильного агента все сушилки конвективного типа можно разделить на две большие группы: 1) в которых при продувке сушильного агента через слой материала частицы последнего остаются неподвижными; 2) в которых частицы материала перемещаются и перемешиваются потоком сушильного агента. К первой группе относятся сушилки с фильтрующим слоем (барабанные, ленточные, петлевые и др.), ко второй — сушилки с взвешенным слоем (кипящим и фонтанирующим), а также пневмосушилки. В сушилках второй группы сушильный агент имеет более полный контакт с частицами высушиваемого материала. Поэтому интенсивность сушки в этих аппаратах выше, а продолжительность процесса меньше, чем в аппаратах первой группы. В практике сушки обезвоженных ОСВ нашли применение сушилки различных типов как первой, так и второй группы. В ФРГ известны эффективные низкотемпературные сушилки, разработанные фирмой «Sevar GmbH» и нашедшие применение в других странах [61]. В Австрии выпущена комплексная установка для обработки ОСВ, предназначенная для обслуживания небольших по мощности станций очистки сточных вод [64]. Основными составными частями данной установки являются устройства для обезвоживания и кондиционирования осадков. В процессе обезвоживания ОСВ производится их коагуляция с последующим прессованием на специальном сетчатом барабанном прессе.

В США запатентован способ сушки и таблетирования ОСВ, который обеспечивает автоматическое проведение указанных процессов при исключении прямого контакта осадка с нагревающей средой [56]. Сушка ОСВ осуществляется через стенки камеры, обогреваемой паром или топочным газом, чем обеспечивается надежная и долговечная работа оборудования. При этом наряду с сушкой проводится отпарка воды и летучих примесей и таблетирование материала, причем органические примеси и биогенные элементы остаются в осадке. Последующая выдержка гранул при температуре 100°C обеспечивает обезвреживание патогенных микроорганизмов. Технологическая схема процесса складывается из стадий сушки и таблетирования механически обезвоженных ОСВ, отсева мелких частиц на виброситах, выдержки полученного материала при 100°C, конденсации паров в отходящих газах и отвода выделяющегося тепла, разложения дурно пахнущих веществ в выбросах в атмо-

сферу. Мелкие частицы после отсева смешиваются с исходным обезвоженным осадком. Выделяющееся при конденсации тепло используется для подогрева исходных ОСВ. Дезодорация выбросов в атмосферу осуществляется при пропускании их потока через высокотемпературную зону печи. При этом часть тепла используется на стадии сушки и таблетирования. Полученные таблетки применяются в качестве топлива или удобрения.

Следует отметить, что в ходе предварительной обработки и прежде всего сушки ОСВ может наблюдаться загрязнение атмосферы некоторыми поллютантами, хотя, как считают авторы [49], при соблюдении соответствующих требований интенсивность техногенного воздействия в данном случае может быть сведена к минимуму. Кроме того, отходящие газы, состоящие в основном из азота, кислорода, водяных паров, диоксида углерода и небольшого количества диоксида серы, обычно не создают условий, требующих сложной газоочистки.

Собственно сжигание ОСВ может производиться как отдельно, так и совместно с традиционными ископаемыми топливами, твердыми бытовыми отходами (ТБО), биомассой. Отдельное сжигание ОСВ обычно осуществляется непосредственно на месте их производства, что исключает необходимость дорогостоящей транспортировки [16]. Большая часть образующейся при сжигании тепловой энергии используется для высушивания осадка, однако иногда необходимо решать вопросы дальнейшего использования тепла. Тепло от сжигания ОСВ может утилизироваться для производства пара или горячей воды. Например, в поселке Рокко Айленд (г. Кобэ, Япония) с 1988 г. эксплуатируется система, состоящая из аппарата сушки ОСВ и печи кипящего слоя [13]. В данном случае удается использовать 43% выделяющегося при сжигании осадка тепла для подогрева воды, что обеспечивает экономию газа на сумму 63-83 фунтов стерлингов в год на каждого жителя поселка (население которого составляет 30 тыс. чел.) и дает значительный экономический эффект за счет снижения затрат на вывоз и захоронение ОСВ в отвалах. При отдельном сжигании теплотворная способность ОСВ не всегда достаточна для поддержания процесса горения, поэтому в этом случае в камеру сгорания приходится дополнительно подавать вспомогательное топливо. Для отдельного сжигания может использоваться только высушенный осадок, что требует специальных сооружений и оборудования. Серьезным препятствием для самостоятельного сжигания ОСВ является вероятность превышения нормативов выбросов в атмосферу оксидов азота и серы, канцерогенных хлорорганических соединений, некоторых тяжелых металлов. Таким образом, отдельное сжигание ОСВ является сравнительно дорогим способом их переработки, требующим использования вспомогательного топлива и создания специальных систем экологического и технологического контроля.

По данным [13], сжигание ОСВ может быть экономичным при производительности более 7500 т/год, что обуславливает необходимость организации централизованного сжигания (обычно при температурах 1300°C в печах с кипящим слоем, снабженных специальной системой газоочистки). Как правило, со снижением производительности растут удельные капиталовложения и срок окупаемости. Однако централизованное сжигание определяет необходимость доставки ОСВ, например, автотранспортом, рентабельность которой возможна при влажности осадка 18-40%, что, в свою очередь, обуславливает обязательность его предварительной сушки – достаточно дорогого технологического процесса. С этой точки зрения интересен проект, который осуществляется в г. Осака (Япония), где имеется 12 станций очистки стоков, причем переработка ОСВ осуществляется только на 8 из них [48]. В 1997 г. в городе приступили к строительству единого Центра, который будет перерабатывать осадки всех станций. Центр расположен на искусственном острове Маишима (место отдыха горожан) и занимает площадь 34 тыс. м<sup>2</sup>; внешне он будет представлять единый архитектурный комплекс. После необходимой предварительной обработки ОСВ будут сжигаться, а образующиеся газы после очистки – выбрасываться в атмосферу через 6 труб высотой 120 м. Остатки от переработки ОСВ до их использования в городском хозяйстве предполагается размещать на

трех этажах специального здания. Планируемое начало работы Центра – март 2010 г. Одновременно создается транспортная система трубопроводов для перемещения шламов со всех станций очистки в строящийся Центр.

Совместное сжигание ОСВ с другими видами топлива (как традиционными, так и нетрадиционными, включая ТБО) используется сравнительно недавно, но уже считается перспективным направлением и одобрено государственными органами ряда стран [16]. Например, Минэнерго Германии признало целесообразным сжигание ОСВ совместно с углем на ТЭС; имеются примеры продолжительного успешного использования данного способа. Удельные расходы на сжигание 1 т ОСВ на одной из угольных ТЭС в Германии (фирма «Saarbergwerke») составляют 650 немецких марок. Исследование эффективности совместного сжигания ОСВ с другими видами органического топлива было проведено в Голландии. В данном случае оценивались следующие показатели: экологическая безопасность, экономичность, техническая осуществимость. Установлено, что по всем показателям наибольшая эффективность наблюдалась при совместном сжигании ОСВ (влажностью не более 10%) с углем. Еще более эффективным считается сжигание ОСВ в цементных обжиговых печах [16]. Как правило, температура в цементных печах значительно выше, чем в котлах ТЭС, что обеспечивает практически полное разрушение содержащих в ОСВ органических соединений, а образовавшиеся в процессе сгорания осадка шлаки включаются в состав шихты. Таким образом, твердые продукты сгорания полностью отсутствуют, что исключает необходимость их обезвреживания и захоронения, снижает экологические риски и удешевляет процесс сжигания ОСВ. Многие специалисты считают совместное сжигание ОСВ с другими видами топлива перспективным направлением по следующим причинам: оно относительно дешево и приемлемо с экологической точки зрения, снижает эмиссию диоксида углерода, является эффективным способом использования энергетического потенциала биомассы, а реализация совместного сжигания может быть выполнена за короткий промежуток времени. Как правило, в случае совместного сжигания ОСВ с другими видами нетрадиционного топлива необходимо проведение специальных исследований, прежде всего из-за вероятного присутствия в нетрадиционных топливах различных вредных (с технологической и экологической точек зрения) примесей.

В последнее время получает распространение изготовление так называемого «вторичного топлива из отходов», которое представляет собой брикеты и гранулы, в состав которых могут входить угольная пыль, измельченная древесина, шламы целлюлозно-бумажной промышленности, отходы нефтепродуктов, а также ОСВ [13, 16]. В качестве связующих материалов используют мелассу, бентонит, лигнин, известь, доломит, нефтяной пек и др., а в качестве добавок вводят древесностружечные отходы, органическую часть промышленных и бытовых отходов и т. п.

### Установки по сжиганию ОСВ

Существующие системы сжигания ОСВ разделяют на следующие основные типы [6-8, 10, 26, 31]: 1) многоподовые (многоочаговые, многокамерные) печи; 2) печи с кипящим слоем инертного носителя (печи КС); 3) устройства для резкой сушки в сочетании с печью, в которой сжигаются ископаемые топлива или отходы; 4) циклонные реакторы; 5) печи влажного окисления (процесс Зимпро); 6) печи сжигания распыленной суспензии; 7) барабанные вращающиеся печи; 8) печи одновременного сжигания ОСВ с отходами.

Наиболее широко используемый тип системы для сжигания ОСВ – многоподовые печи, особенно пригодные для отходов, которые трудно поддаются сжиганию. Уже в середине 1930-х гг. они стали применяться для сжигания ОСВ, образующихся при очистке бытовых сточных вод. Многоподовая печь представляет собой стальную конструкцию, футерованную огнеупорным кирпичом и

состоящую из нескольких подов (камер, секций) сгорания (их количество изменяется от 5 до 12). Поды имеют чередующиеся отверстия для загрузки и выгрузки движущегося сверху обезвоженного осадка. Специальное вращающееся устройство (полый вал) перемещает горящие отходы к отверстию. Несгоревший материал падает в следующую (нижнерасположенную) камеру, и процесс повторяется, пока горение не завершится. Воздух для горения подается (воздуходувкой) навстречу горящему материалу, газообразные продукты сгорания выходят сверху. Зола разгружается снизу, охлаждаясь подаваемым воздухом. Температура у самого дна печи достигает примерно 330°C, в зоне средних очагов 870-890 – 980-1000°C, на самом вершине – около 540-550°C. Выходящие из зоны горения газы подогреваются, используя дополнительное топливо, до достаточно высокой температуры, чтобы разрушить запахи. Выбрасываемые из печи газы, как правило, проходят через скруббер для удаления летучей золы (при мокром скруббировании). Многоподовые печи отличаются более низким расходом электроэнергии, более высокой производительностью, простотой загрузки отходов, однако их движущиеся части (вал, скребковые мешалки) часто требуют замены прогоревших частей в зоне высоких температур и довольно высоких капитальных и эксплуатационных затрат. Тем не менее установки, созданные на их основе, просты, долговечны, достаточно универсальны, характеризуются легкостью изменения параметров, что обеспечило им широкое применение в Англии, США, ЮАР, Японии и других странах.

Широкое применение для сжигания (и сушки) ОСВ получили также печи кипящего (псевдоожиженного) слоя (печи КС), которые характеризуются определенными преимуществами: идеальное перемешивание осадка с газами, поддерживающими горение; отсутствие движущихся частей (меньшие требования к обслуживанию); печь может работать по 4-8 час в день с небольшим подогревом при новом цикле сжигания; поскольку тот же самый слой является источником тепла, не требуется механической системы для удаления золы, так как зола удаляется вместе со сгоревшими газами из реактора; теплообменные процессы протекают внутри песчаной насадки, что снижает потребность в теплообменниках для обеспечения эффективности процесса; песчаная насадка выполняет функции аккумулятора тепла, что позволяет вести процесс без чрезмерных температурных нагрузок. Сжигающее устройство состоит из колонны, заполненной горячим песком, глиноземом или фторпластом размером частиц 1-5 мм. В слой этого инертного материала вдувается воздух и измельченные отходы. При определенной критической скорости потока газа весь инертный слой поднимается, переходя во взвешенное (турбулентное) состояние, напоминающее кипящую жидкость. Поступивший сюда осадок интенсивно перемешивается с инертным слоем. При этом резко повышаются параметры теплоотдачи. Рабочая температура составляет 760-810°C. Для того чтобы подавить дурно пахнущие запахи, избегают режимов работы на нижнем уровне температуры. ОСВ подаются в нижнюю часть камеры сгорания, чуть выше распределительной пластины. Поток воздуха, который перемешивает осадок с песком, входит ниже распределительной пластины. Осадок подсыхает и сгорает, при этом большая часть тепла передается песчаной насадке. Газообразные продукты сгорания и зола покидают реактор в его верхней части. Вспомогательная горелка используется для разогрева песка до необходимой температуры перед подачей осадка. После того как достигнута соответствующая рабочая температура, эта вспомогательная горелка может быть использована для сжигания жидких и газообразных отходов. Образовавшаяся зола с размерами частиц 1-150 мкм легко выносятся из печи потоком отходящих газов, улавливается, а затем удаляется (например, в золоотвал). Печи КС применяются в США, Франции, ФРГ, Швейцарии, Японии и др. странах. В последние годы используются агрегированные установки – печи с кипящим слоем и котлом-утилизатором, которые обеспечивают возможность сжигания различных отходов совместно с ОСВ.

Авторы многих публикаций единогласно отдают приоритет печам КС, причинами популярности которых являются высокая эффективность сгорания, компактность, относительно низкие капи-

тальные затраты и эксплуатационные расходы, простота обслуживания [16]. Основное преимущество высокотемпературных установок кипящего слоя – невосприимчивость к неравномерной подаче обрабатываемого материала. Поскольку в материале рабочего слоя аккумулировано большое количество тепла, изменения в подаче, составе и влажности поступающих на сжигание ОСВ оказывают меньшее влияние на работу установок с печами КС, чем на установки сжигания других конструкций. Однако высокие концентрации в подаваемых ОСВ солей щелочных металлов, железа и фосфора могут создавать серьезные технологические и экологические проблемы. Считается, что преимущества псевдоожиженного слоя реализуются в следующих случаях: 1) топливо тщательно отсортировано, из него удалены крупные агломераты, препятствующие псевдоожижению циркулирующего слоя, низкотемпературные флюсы (типа натриевого стекла); 2) топливо легко воспламеняется, зола равномерно распределяется по камере сгорания; 3) для нейтрализации серы и хлора используется известняк; 4) для обеспечения полного сгорания топлива в циркулирующем инертном слое используется материал с абразивными частицами. К этому следует добавить, что печи КС рационально (с экономической точки зрения) использовать для переработки больших количеств отходов, которые трудно сжигать обычными способами. Конструктивно-технологическими недостатками печей КС являются неравномерность распределения обрабатываемых частиц осадка в вихревом потоке и их слипание и спекание, особенно при разных размерах частиц ОСВ.

Резкое осушение основано на мгновенном удалении влаги из твердого осадка при введении его в горячий газовый поток. Преимущества данной системы: осадок может быть осушен и сожжен в соответствии с текущими потребностями практически немедленно; конечное содержание влаги можно контролировать очень строго, поскольку в системе одновременно обрабатывается относительно небольшое количество осадка; система может быть запущена и остановлена за короткий период времени; нет необходимости в дополнительном топливе, поддерживающем горение, если шлак не подвергался обработке.

Циклонные реакторы (печи циклонного типа) представляют собой идеальную систему для уничтожения ОСВ, образующихся на малых станциях обработки сточных вод; они просты в обращении и универсальны в эксплуатации. Механизм действия циклонных реакторов состоит в том, что предварительно нагретый от продуктов сгорания воздух с высокой скоростью тангенциально вводится в цилиндрическую камеру сгорания. Концентрированный осадок разбрызгивается радиально в направлении интенсивно нагретых стенок камеры сгорания и немедленно подхватывается быстрым циклонным потоком горячих газов, в результате сгорание происходит настолько быстро, что материалы не успевают прилипнуть к стенкам. Зольный остаток подхватывается циклонным потоком и выносится из реактора. Печи высокоэффективны, что достигается вихревым потоком. Сушка предварительно обезвоженных ОСВ осуществляется за счет теплоты отходящих топочных газов.

Процесс влажного окисления основан на том, что любое вещество, которое горит, может быть окислено в присутствии воды при температурах от 140 до 390°C. Строго говоря, этот процесс нельзя сравнивать с обычным сжиганием, поскольку он в первую очередь предназначен для стерилизации. При окислении в присутствии воды не происходит образования летучей золы и пыли. Основной недостаток процесса влажного окисления – высокая стоимость конструкции и эксплуатации, сложность обрабатываемого и очистного оборудования, требующего высокой квалификации обслуживающего персонала. Кроме того, возможны утечки газов и выброс золы из ловушек, куда могут падать газы, содержащие золу.

Печи сжигания распыленной суспензии предназначены для высокотемпературной обработки ОСВ (при низком давлении). В общем случае этот процесс включает следующие этапы: 1) сгущение подаваемого осадка до 8%-ного и большего содержания твердых веществ, 2) измельчение осадка до размера частиц не более 25 мкм, 3) распыление осадка в верхней части реактора, чтобы образова-

лась «распыленная суспензия», 4) сушка и сжигание осадка в реакторе, 5) улавливание золы из горячих газов. Такие системы обладают следующими преимуществами: универсальность в обработке осадка, небольшие габариты, быстрое превращение сырого осадка в золу, пар и CO<sub>2</sub>, отсутствие неудобств для окружающих.

Барабанные вращающиеся печи относятся к одним из первых устройств для сжигания ОСВ. Они представляют собой наклоненный стальной цилиндр (барабан), футерованный огнеупорным материалом. Диаметр барабана равен 1-3 м, а длина достигает 8-15 м и больше. С помощью бандажей и опорных роликов барабан вращается со скоростью одного оборота в 0,8-2 мин. От барабанных сушилок печи отличаются устройством выгрузочной камеры, которая выполнена в виде вертикальной топки, где осуществляется дожигание осадка. Выпуск золы производится в нижней части топки, а выпуск отходящих газов – в верхней. Вместе с отходящими газами улетучивается около 20% пылевидного сухого вещества, которое задерживается в циклонах и мокрых скрубберах. Наряду с простотой устройства и большой производительностью барабанные печи имеют существенные недостатки: они громоздки и характеризуются относительно низким КПД; сжигание ОСВ сопровождается комкованием, а следовательно, недожогом осадка, который устраняется в выгрузочной камере; наличие тонкой футеровки приводит к потере теплоты и дополнительному расходу топлива.

В табл. 1 дается сравнительная характеристика работы различных печей, используемых для сжигания ОСВ и других отходов.

Таблица 1. Сравнительная характеристика работы печей при огневом обезвреживании отходов [31]

Печь	Температура отходящих газов, °С	Удельная нагрузка рабочего объема по уничтожаемому до ПДК веществу, кг/(м <sup>3</sup> х час)	Коэффициент избытка воздуха	Коэффициент неравномерности пребывания в зоне горения	Недостатки
Многоподовая	310-520	200-400	1,08-1,2	1	Загрязнение газов органическими продуктами от свежих порций ОСВ в верхней части печи; низкие удельные тепловые нагрузки; вращающиеся элементы в высокотемпературной зоне; использование дорогостоящих материалов для полого вала и скребковых мешалок; высокие капитальные и эксплуатационные затраты
Камерная	650-900	250	1,08-1,2	1	Низкие весовые нагрузки; громоздкость; высокая металлоемкость; повышенные требования к коррозионной устойчивости материала колосниковой решетки и механизации топочных устройств; большие капитальные затраты
Барабанная	650-1000	10-80	1,1-1,6	возможно 1	Самая низкая удельная тепловая и весовая нагрузки топочного объема; разрушение футеровки, быстрый выход печи из строя из-за резкой смены температуры при вращении печи и эрозии; высокие капитальные и эксплуатационные затраты
Распылительная	650-860	80-100	1,1-1,8	1	Низкая производительность; сложность в эксплуатации; высокие капитальные затраты
Циклонная	1200	600-850	1,04-1,6	возможно 1	Необходимость установки мощных пылеулавливающих устройств и дополнительного оборудования для выгрузки
С псевдоожиженным слоем	600-850	300-800	1,04-1,3	при подаче на слой 1	Неравномерность распределения и времени пребывания в слое частиц твердой фазы; необходимость пылеулавливания

В настоящее время во многих странах проводятся опытно-конструкторские работы по совершенствованию традиционных и разработке новых технологий сжигания ОСВ.



В Великобритании в середине 1990-х гг. одной из самых эффективных считалась установка по сжиганию ОСВ в Бредфорде, которая включает устройства для обезвоживания, сжигания (печь КС) и газоочистки [55]. Сжигаемый осадок имеет теплотворную способность 22-27 тыс. кДж/кг, но устойчивый процесс автотермического сжигания происходит только при наличии 30% сухого вещества в ОСВ. В ФРГ до середины 1990-х гг. ОСВ сжигались преимущественно в многоподовых печах или в печах КС [43]. К настоящему времени в стране накоплен успешный опыт сжигания ОСВ в котлоагрегатах ТЭС и в цементных печах. В опытно-промышленных условиях апробированы методы низкотемпературной конверсии ОСВ, их пиролиза и швелелевого сжигания. В г. Рур-Дюрене (600 тыс. жителей) с 1974 г. эксплуатируется установка по сжиганию ОСВ и промышленных шламов, построенная немецкой фирмой «Лурги» [7]. Установка по обработке и сжиганию ОСВ успешно функционирует на очистной станции г. Франкфурта-на-Майне, где общее количество осадков из первичных отстойников и избыточного ила после уплотнения составляет примерно 7000 м<sup>3</sup> в сутки при концентрации 3-4% сухого вещества. В Австрии (в г. Вене) на установке EBS-SAB (фирмы «Simmering») в 2-х топках с кипящим слоем (при 850°C) сжигаются ОСВ без предварительной сушки [13]. Для их подачи используются насосы. Установлено, что при содержании сухого вещества 37% сырые ОСВ горят самостоятельно без применения дополнительного топлива, что позволяет соблюдать требования по содержанию NO<sub>x</sub> в дымовых выбросах.

С конца 1980-х гг. в Японии для сжигания ОСВ стали широко применяться печи КС, которые постепенно вытесняют многоподовые печи [57]. В 1989 г. в г. Иокогаме на 2-й станции очистки сточных вод была введена в действие установка для сжигания ОСВ (производительностью 150 т/сут), в которой реализована энергосберегающая технология, разработанная японской фирмой «Mitsubishi Heavy Industries», имеющей большой опыт в данной области [41]. В установке используется топка с кипящим слоем, кожухотрубный теплообменник, работающий на газах с высоким содержанием пыли, устройство предварительной сушки обезвоженного осадка путем косвенного нагрева. Тепло, полученное в теплообменнике, используется для сушки осадка и нагрева воздуха горения. Газы, образующиеся в метантенках, применяются в качестве вспомогательного топлива и обеспечивают экономию энергии. На установке могут сжигаться низкокалорийные осадки (2200-2900 ккал/кг сухой массы), что недостижимо на других установках аналогичного назначения. Для очистки отходящих газов используются циклон, электрофильтр и абсорбционная колонна, в которой улавливаются дурно пахнущие газы и оксиды серы. В последние годы в Японии разработана высокоэффективная установка для обработки ОСВ, которая состоит из машины для обезвоживания осадка (ленточного фильтр-пресса) и системы его сжигания [60]. Из фильтр-пресса выдается осадок с влажностью менее 70%. Сжигание ОСВ осуществляют в циркуляционной печи с кипящим слоем. Установка обладает следующими преимуществами: 1) почти на 35% уменьшается площадь под установкой, 2) снижается расход дополнительного топлива, необходимость в котором полностью отпадает во время работы установки, 3) на 25% уменьшается объем отходящих газов.

Большое внимание уделяется разработке технологий и устройств для совместного сжигания ОСВ и ТБО. Так, на Тайване разработана относительно простая технология совместного сжигания осадка с ТБО [16]. В США (шт. Флорида) для совместного сжигания твердых бытовых отходов и осадка сточных вод успешно апробирована вращающаяся печь типа «Westinghouse O'Connor MCY Bay County» [42]. Фирмой «Фон Ролл» (Швейцария) предложена комбинированная печь, где твердые бытовые отходы и ОСВ сжигаются на отдельных колосниковых решетках [26]. При этом верхняя колосниковая решетка предназначена для сжигания предварительно обезвоженного осадка, а нижняя – для сжигания ТБО. Колосниковые решетки имеют встречный наклон и расположены со смещением по горизонтали и по высоте. Немецкой фирмой «Лурги» разработаны две схемы сжигания ТБО и ОСВ. По первой схеме сушка осадка и сжигание совместно с ТБО осуществляются в

многоподовой печи. Второй схемой предусматривается раздельное сжигание ТБО – в печи с наклонно-переталкивающей колосниковой решеткой и ОСВ – в многоподовой печи. Разделение сжигаемых продуктов по двум установкам позволяет учесть различную интенсивность их горения и использовать теплоту, получаемую при сжигании отходов, для подсушки осадка путем пропуска горячих дымовых газов через многоподовую печь. Фирмой «Cosea» (Франция) разработана установка для обработки жидких осадков с утилизацией теплоты дымовых газов от сжигания ТБО, которая включает распылительную печь для сжигания осадка и сушилку [26]. Дымовые газы от сжигания ТБО в печи с температурой 900-1000°C поступают в распылительную печь для сжигания осадка, где навстречу потоку дымовых газов с помощью насоса-дозатора и распылителя впрыскивается осадок. Капли осадка подсушиваются, подхватываются потоком дымовых газов, сгорают и поднимаются в верхнюю часть печи. Дымовые газы, проходя сушилку, охлаждаются и направляются в фильтр для очистки, откуда они отсасываются вентилятором и выбрасываются через трубу в атмосферу. Уловленные зола и минеральные частицы собираются в сборнике и через секторный затвор удаляются. Остаток от сжигания ТБО в виде золы и несгоревшего мусора (в основном металла) конвейером выводится из печи. С помощью магнита из него извлекается металл, а остальная часть вывозится на свалку или используется для планировки местности.

Среди других технологий, предлагаемых различными компаниями, можно отметить следующие [16]: SUN-SAND-процесс (фирма «FMI Process», Франция); Enersludge TM-процесс (фирма «Environmental Solution International Ltd.», Австрия); полное высокотемпературное сжигание осадка и сжигание осадка в псевдоожиженном слое (фирма «TSUKISHIMA KIKAI CO., Ltd.», Япония); вращающаяся печь (фирма «Chugai Ro Co., Ltd.», Япония); установка сушки и сжигания осадка компании РКА; процесс сжигания осадка (фирма «OSAKA GAS», Япония); WGT-процесс (Великобритания); технологии компании «Martin GnbH» (Германия); печи для сжигания осадка (фирма «Kubota», Япония); сжигание осадка на ТЭС совместно с бурным углем (фирма «Putzmeister AG»); технология совместного сжигания осадка с твердыми бытовыми отходами (фирма «LURGI Entsorgung GmbH», Тайвань); обогащение кислородом при совместном сжигании твердых муниципальных отходов и ОСВ (Минэнерго США); технология компании «Von Roll»; процесс термической регенерации отходов компании «Siemens»; конверсионный процесс компании «Noel» и др. Известностью пользуются также разработки немецкой фирмы «Лурги», финских компаний «Гампелла» и «Оутокумпа» [7].

### Очистка выбросов

Образующиеся при сжигании ОСВ отходящие газы содержат высокие концентрации различных поллютантов, что предъявляет повышенные требования к эффективности газоочистного оборудования. В большинстве случаев на современных предприятиях по сжиганию ОСВ системы очистки отходящих газов и подавления запахов представляют собой достаточно сложные и дорогостоящие сооружения, поэтому удешевление очистки является одной из основных проблем дальнейшего совершенствования используемых в данной отрасли технологий.

Для улавливания выбросов из печей сжигания ОСВ, как правило, используют циклоны и мокрые скрубберы [8]. Эффективность циклонов составляет 75-80%. Их применение удобно при температурах дымовых газов от 343 до 371°C. Скрубберы менее чувствительны к нагрузкам и температурам газа; кроме того, они извлекают из потока значительную часть конденсирующихся газов. В общем случае природа аэрозолей, выбрасываемых из печей для сжигания ОСВ, не подходит для улавливания в циклонах, и в большинстве систем используют мокрые скрубберы различных типов, включая Вентури, с перегородками, колонного типа и тарельчатого с барботажными колонками

(табл. 2). Эти скрубберы имеют существенное преимущество, которое проявляется в абсорбции значительного количества газов, включая оксиды серы, а также дурно пахнущие органические соединения. Скруббер типа Вентури позволяет удалять твердые частицы размером до 0,1 мкм [6]. Для повышения эффективности улавливания твердых частиц в узком месте трубы Вентури через распылительные сопла подается вода. Мелкие капли воды, подхваченные потоком газа, удаляются после скруббера.

Таблица 2. Эффективность устройств для улавливания твердых частиц, % [28]

Устройство	Размеры частиц, мкм		
	50	5	1
Инерционный коллектор	95	16	3
Высокоэффективный циклон	96	73	27
Скруббер с разбрызгивающим устройством	99	94	55
Скруббер с насадкой	> 99	98	58
Электростатический осадитель	> 99	99	86
Скруббер Вентури (высокоэнергетический)	100	> 99	98
Низкоскоростной рукавный фильтр	100	> 99	99

По данным [16], первым процессом очистки дымовых газов от печей сжигания ОСВ является выделение из них взвешенных частиц (пыли). Наиболее распространенным оборудованием, используемым для этой цели, являются тканевые (мешочные) фильтры, электрофильтры и циклоны. Последние из-за недостаточной эффективности используются, как правило, только на стадии предварительной очистки. Наибольшая эффективность достигается при очистке тканевыми фильтрами. Сухой и полусухой процессы отличаются только способом ввода реагента. Мокрое удаление кислых газов основано на другом принципе: загрязняющие примеси поглощаются водой в скрубберах мокрой очистки. Для регулирования величины рН воды и нейтрализации сточных вод используются щелочные реагенты. Количество вводимых в газы реагентов зависит от химического состава газа, но всегда значительно больше при сухой нейтрализации. Так, при сухом способе рекомендуемая доза превышает стехиометрическую потребность в 2-3 раза, тогда как при мокрой нейтрализации рекомендуемый избыток реагента составляет 20%. Процесс каталитического селективного восстановления проходит в каталитическом преобразователе при температуре примерно 250°C. Процесс некаталитического селективного восстановления (т. е. при отсутствии каталитического преобразователя) требует температуры около 900°C и значительного избытка аммиака. Для удаления ртути, кислых компонентов, органических поллютантов (диоксинов, фуранов) в системах газоочистки устанавливаются угольные адсорберы.

Особую проблему при сжигании ОСВ представляет удаление (разрушение) дурно пахнущих органических соединений. Запахи могут быть разрушены в самом источнике или извлечены из потока очистными устройствами. Основные требования, выполнение которых предотвратит утечку запахов, сводятся к правильной конструкции установки и к правильной эксплуатации. Считается, что запахи в случае выделения могут быть разрушены одним из перечисленных ниже способов с соответствующими ограничениями [8]: сжигание; химическое окисление; абсорбция; разбавление; маскировка. По мнению автором цитируемой работы, каждый из этих пяти способов обладает полезными качествами при подавлении запахов, но практически при сжигании ОСВ используют два способа. Основной и наиболее успешный подход состоит в том, чтобы создать условия, при которых происходит гарантированное выдерживание всех газов, образованных при сжигании в используемой системе, при достаточно высокой температуре и в течение достаточно продолжительного времени, что в свою очередь обеспечивает удовлетворительное окисление всех органических веществ. Принято считать, что если газы выдерживаются при температуре 780°C, то за несколько се-

кунд произойдет окисление. Таким образом, если газы выдерживаются при указанной температуре от 10 до 60 с, то никаких запахов в выбросах не должно быть. Однако если печь плохо сконструирована или неправильно эксплуатируется и не поддерживается на должном уровне, то дымовые газы будут иметь неприятный запах, что является серьезной проблемой [8]. Реже используется другой метод подавления запахов, когда газы отводятся в камеру для вторичного сжигания, где проходят через пламя, образованное природным газом или (чаще) нефтепродуктами. При этом в пламени происходит ускоренное разрушение органических веществ. Газы могут также пропускаться через каталитическую систему, где окисление может происходить при пониженных температурах.

### Эмиссия поллютантов при сжигании ОСВ

Наличие в ОСВ в повышенных количествах различных химических элементов и соединений обуславливает вероятность их перехода в образующиеся при сжигании пылегазовые выбросы и последующего поступления в окружающую среду. Как правило, при сжигании отходов такие химические элементы, как ртуть, мышьяк и селен, могут проходить через систему очистки продуктов сгорания без задержки в достаточно большом количестве [6]. Предполагается также, что металлы и оксиды металлов с низкими температурами кипения будут отгоняться от остатка и уноситься преимущественно с летучей золой [28]. Хлор в топочных газах, судя по всему, практически полностью находится в виде хлористого водорода. Установлено, что при сжигании ОСВ алюминий, кальций, хром, железо, марганец, никель, кремний переходят в шлаки, в газовой фазе находятся ртуть, кадмий, свинец [13]. Обычно при сжигании тяжелые металлы оказываются связанными с частицами размером не более 1 мкм, и выброс пылевидных частиц обуславливает загрязнение атмосферы. В настоящее время, по мнению специалистов из Германии (мирового лидера в использовании технологий сжигания ОСВ) [16], установленные для сжигания ОСВ нормативы выбросов различных поллютантов в атмосферу выполняются с большим трудом, а для соблюдения нормативов, например, по выбросам ртути (в повышенных концентрациях содержащейся в ОСВ самых различных городов [33-35]), требуются специальные мероприятия.

С рассматриваемой точки зрения показательны исследования, выполненные на очистной станции г. Сент-Пол (США), производительностью (по обрабатываемым сточным водам) до 10 м<sup>3</sup>/с [36]. Используемая здесь технологическая схема предусматривает очистку стоков в аэротенках после прохождения первичных отстойников и последующее сжигание образующихся осадков и избыточного активного ила в многоподовых печах. Сточная вода из мокрых скрубберов, очищающих газы из печей, направляется для очистки в аэротенки. Установлено, что около 85% ртути, находящейся в сточных водах, было связано с взвешенными веществами размером 0,005 мм и крупнее. Из ежесуточно приносимых сточной водой в среднем 248 г ртути (=100%) только около 10 г (4%) сбрасывалось с очищенной сточной водой. Примерно 181 г (73%) ртути оставалось в осадках первичных отстойников. В аэротенки, где поллютант эффективно поглощается хлопьями активного ила, кроме ртути, не задержанной первичными отстойниками (67 г, или 27%), в сутки попадало 153 г ртути (63% от приносимой со сточными водами) с водой из скрубберов газоочистки. В поступающем на сжигание осадке обнаружено до 399 г ртути (161% от поступающей из канализации). В уходящих в атмосферу после очистки газах из печей содержалось 241 г ртути (97%). Из-за принятой схемы газоочистки ртуть циркулировала в системе водоочистки и почти целиком (более 95% от поступающей по канализации) уходила в атмосферу. В шлаках ртуть не обнаруживалась.

В то же время, согласно исследованиям, выполненным в шт. Нью-Йорк на 6 системах по сжиганию ОСВ, очистными установками улавливалось 96% ртути (при нормативе – 99%), выделяющейся при сжигании ОСВ [65]. Сжигаемые осадки содержали 75% влаги и 25% твердых частиц, из

которых 3/4 составляли летучие вещества и 1/4 – зола. Результаты исследования поведения ртути при сжигании смешанных отходов в мусоросжигательных установках показали [29], что из 0,27 г ртути, содержащейся в 1 т отходов, 0,2% выбрасываются в атмосферу с отходящими газами, 1,1% попадает в сточные воды, 94,7% остается – в золе и около 4% оседает с пылью в электрофильтрах и других газоочистных устройствах. Наиболее эффективно улавливание содержащейся в отходящих газах ртути угольным сорбентом, однако это приводит к возникновению опасных отходов, требующих дополнительной утилизации или безопасного захоронения. Следует отметить, что присутствие в ОСВ галоидозамещенных органических веществ определяет образование молекул хлора, хлороводородной кислоты, что не исключает вероятности образования летучих хлоридов ртути.

В табл. 3 и 4 приведены данные по выбросу аэрозолей из 10 печей для сжигания ОСВ, эксплуатируемых в США.

Таблица 3. Полные выбросы аэрозолей из многоочаговых печей для сжигания ОСВ после очистки в скруббере с тарелками [8]

Показатель	Установка				
	А	В	С	Д	К*
Выбросы, г/кг сухого осадка	0,72	0,40	0,67	0,74	5,9
Эффективность работы скруббера, %	83	92	92	99	78
Перепад давления, Па	250	480	420	150	-
Год создания (модификации) скруббера	1974	1972	-	1972	1966
Производительность, кг сухого осадка в 1 час	1280	1398	2443	2711	778

\* Без скруббера, только сухой циклон.

Таблица 4. Выбросы аэрозолей из печей для сжигания ОСВ после очистки в скруббере Вентури и скруббере с колпачковыми тарелками [8]

Показатель	Установка				
	Е	Ф	Г	Н	Ж
Выбросы, г/кг сухого осадка	0,13	0,59	2,6	0,87	0,036
Эффективность работы скруббера, %	93	93	96	96	97
Перепад давления, Па	510	510	-	-	410
Год создания (модификации) скруббера	1960	1976	1973	1976	1970
Тип печи *	МО	МО	КС	МО	КС
Производительность, кг сухого осадка в 1 час	1597	936	93	640	1340

\* МО – многоочаговые печи; КС – печи кипящего слоя.

Данные этих таблиц показывают, что три из пяти печей, оборудованные как скрубберами типа Вентури, так и скрубберами с барботажными тарелками, отвечают стандартам и лишь одна из пяти печей, оборудованная только скруббером с барботажными тарелками, отвечает этому стандарту. Скруббер на этой печи (установка В) имеет максимальный перепад давления. Печь, оборудованная сухим циклоном, не отвечает стандарту. Можно также сделать вывод, что эксплуатационные характеристики при сочетании скрубберов имеют преимущества. В этих десяти печах были отобраны твердые остатки и проанализированы на содержание основных тяжелых металлов. Данные о соотношениях массы металлов, которые выносятся с газообразными продуктами сгорания, выходящими из скруббера, и массы металлов, подаваемых в печь, приведены в табл. 5. Очевидно, что улавливание частиц свинца и кадмия гораздо хуже, чем железа и никеля. Большие потери свинца и кадмия обусловлены тем, что они в большей пропорции содержатся в самых мелких частицах, которые плохо захватываются улавливающими системами. Как и все улавливающие системы, скрубберы захватывают более мелкие частицы с меньшей эффективностью, чем более крупные; таким образом, выход из потока свинца и кадмия ниже, чем можно было бы ожидать на основании данных о полной эффективности.

Таблица 5. Доля металла, который выносятся из скруббера, % от загрузки [8]

Установка*	Тип скруббера**	Выбрасываемый металл, % (металл в загрузке=100%)			
		Кадмий	Железо	Никель	Свинец
A	БТ	29,4	0,006	0,38	3,8
C	БТ	35,9	0,02	0,14	3,5
D	БТ	14,2	0,05	0,35	13,8
E	В-БТ	9,1	0,01	0,12	4,5
F	В-БТ	6,0	4,16	0,08	5,6
H	В-БТ	16,0	0,12	0,28	14,7
J	В-БТ	0	0,02	1,1	0
K	Ц	14,7	0,40	1,5	16,9

\* См. табл. 3 и 4.

\*\* БТ – с барботажными тарелками; В-БТ – Вентури и с барботажными тарелками; Ц – сухой циклон.

В табл. 6 показано распределение массы каждого из четырех металлов в частицах размером от 0,1 до 1,0 мкм относительно общей массы металла в каждой из фракций (здесь приведены данные для двух установок). Во всех случаях большее относительное количество кадмия и свинца сконцентрировано в более мелкой фракции частиц, входящих в скруббер.

Таблица 6. Распределение массы металлов в частицах размером от 0,1 до 1,0 мкм [8]

Установка *	С		Н	
	БТ		В-БТ	
Тип скруббера **	Вход	Выход	Вход	Выход
Место на скруббере				
Металлы:				
Кадмий	86	99	68	97
Железо	24	83	5	19
Никель	38	89	10	18
Свинец	42	99	68	44

\* См. табл. 3 и 4.

\*\* БТ – с колпачковыми тарелками; В-БТ – Вентури и с колпачковыми тарелками.

В работе [8] приводятся нормативы Агентства по ООС (США), применимые к печам по сжиганию ОСВ (1979 г.): аэрозоли, г/кг подаваемого сухого осадка – 0,65; мутность, % – 20; бериллий, г/сут – 10; ртуть – г/сут – 3200; свинец, нг/м<sup>3</sup> – 1500; кадмий, нг/м<sup>3</sup> – 100 (норматив находился на стадии обсуждения). В стандартах Агентства по ООС нет ограничений на выбросы оксидов азота или серы, поскольку количества и концентрации этих поллютантов обычно низки по сравнению с другими известными техногенными источниками их выбросов. Нормативы на выбросы частиц различны в разных районах страны. В США до 1970-х гг. на практике ограничения на выброс составляли 0,85 кг выбрасываемой золы на 1000 кг дымового газа с учетом 50%-ного избытка воздуха (429,9 нг/Дж). Большинство производителей печей старались ограничить выброс аэрозолей до 0,20-0,28 кг/1000 кг отходящих газов при 50%-ном избытке воздуха.

### Сжигание ОСВ в России

Первый в России (и СНГ) завод по сжиганию ОСВ был пущен в эксплуатацию в 1997 г. в г. Санкт-Петербурге на Центральной станции аэрации (ЦСА), расположенной на острове Белый, где осадки сжигаются в печах кипящего (псевдоожиженного) слоя (технология «Pyrofluid») [4, 17, 22, 50, 52, 54]. В прежнее время с ЦСА автомашинами вывозилось на полигоны 1000-1200 т/сут ОСВ; сейчас с о. Белый вывозятся лишь 60-70 т/сут ОСВ. В основу завода положена технология французской фирмы «Omnium de Treatment et de Valorisation». Этот комплекс стал крупнейшим из нескольких десятков установок сжигания построенных за последние 30 лет в развитых странах Европы [5].

Поступающие на ЦСА сточные воды с помощью насосов накапливаются в приемной камере, откуда подаются на механизированные решетки и песколовки, где задерживаются грубые примеси и песок. Далее стоки поступают в первичные отстойники, где происходит отделение взвешенных и плавающих вещества. Осадок первичного отстойника сжигается на заводе. Механически очищенная осветленная сточная вода поступает в аэротенки, куда также подается активный ил и воздух. В аэротенках происходит биологическая очистка сточных вод и удаление растворенных органических соединений. Затем биологически очищенная вода с илом поступает на вторичные отстойники, где происходит разделение воды и ила. Далее вода сбрасывается в залив, а осевший ил поступает обратно в аэротенки и после регенерации вновь смешивается с поступающей сточной жидкостью. Избыточный ил сжигается. Производительность завода по сжиганию ОСВ составляет 250 т сухого вещества в сутки (т. е. более 91 тыс. т в год). В настоящее время на ЦСА сжигается 47% от общего количества обезвоженных осадков. После сжигания ОСВ образуется зола, объем которой в 10-12 раз меньше необработанного осадка. Газы, образующиеся при сжигании ОСВ, перед поступлением в атмосферу подвергаются золо- и пылеудалению на электрофильтре (эффективность 99,9%) и мокрой очистке (кислотная и щелочная промывка). По данным ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», качество очистки дымовых газов соответствует требованиям российских и зарубежных стандартов, например, концентрации диоксинов в отходящих в атмосферу газах не превышают 0,1 нг/м<sup>3</sup>. Зола накапливается в бункере электрофильтра и затем вывозится на утилизацию.

Все оборудование комплекса обработки ОСВ работает в автономном режиме под управлением системы «Centum CS» фирмы «Yokogama» (Япония).

В июле 2005 г. на Юго-Западной станции аэрации (ЮЗСА) г. Санкт-Петербурга началось строительство еще одного завода по сжиганию ОСВ. Финансирует строительство Европейская Комиссия (в рамках программы «Тасис»). Генеральным подрядчиком работ выступает немецкая компания «BAMAG GmbH», подрядчиком строительных работ – ЗАО «Лен-Тек», часть оборудования поставит компания «SES» (Словакия); осуществлять надзор за строительством по решению Еврокомиссии будет датская компания «Ramboll» [11, 51, 52]. После введения в эксплуатацию завод станет перерабатывать около 300 м<sup>3</sup> обезвоженного осадка в сутки (~ 68 т на сухое вещество). По сведениям ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», использование на заводе современной технологии позволит улавливать до 99% вредных веществ. В ходе сжигания будет образовываться до 20 тыс. т золы в год [54]. Завод будет введен в эксплуатацию в 2007 г.

На ЮЗСА процесс очистки стоков включает: механическую очистку (решетки, песколовки, первичные отстойники), биологическую очистку (аэротенки, вторичные отстойники), дезинфекцию ультрафиолетовым облучением [3, 11]. Первым этапом обработки образующихся в ходе очистки стоков ОСВ является обезвоживание на центрифугах, при этом объемы обезвоженных осадков (при проектной производительности по сточным водам 330000 м<sup>3</sup>/сут) достигают 320-400 м<sup>3</sup>/сут. Вторым этапом утилизации обезвоженных ОСВ является их сжигание в печах с псевдосжиженным слоем. Кроме того, сжиганию будет подвергаться ограниченное количество жировых веществ, задерживаемых на ЮЗСО. Природный газ планируется использовать в качестве вспомогательного топлива, в основном для стартового разогрева печей. Завод будет обеспечивать сжигание в двух печах 55-75 т сухих ОСВ и 2,2 т жировых веществ в сутки. Содержание сухих веществ в сжигаемых ОСВ будет составлять 18-29% (в среднем 22%), в том числе органических веществ 55-70% (63%), а низшая теплотворная способность осадка составит 20-25 кДж/кг. Каждая технологическая линия завода по сжиганию ОСВ включает печь с псевдосжиженным слоем, котел-утилизатор и систему очистки дымовых газов. Получаемый пар высокого давления подается на установку парового турбогенератора, которая является общей для двух технологических линий. Обе линии работают независимо друг от друга минимум 8000 час. в год. Специальная система подачи обеспечивает поступление ОСВ, обра-

зующихся на ЮЭСА, в специальное устройство, оснащенное регулируемыми скребками быстрого вращения, которые подают осадок в печь сжигания и распределяют его по псевдооживленному слою. Каждая печь состоит из 3-х вертикальных секций: нижней секции (камера флюидизации воздуха), секции псевдооживленного слоя, верхней секции реактора. Псевдооживленный слой состоит из кварцевого песка, обладающего достаточным сопротивлением перепадам температур и истиранию в кипящем слое. Печи полностью автоматизированы и автоматически отключаются при значительных отклонениях от основных параметров. Для снижения выбросов  $SO_2$  и добавки щелочных реагентов в мокром скруббере предусмотрена одна общая система хранения и подачи извести в обе печи. Количество извести, подаваемое в печь, регулируется оператором в зависимости от качества очистки дымовых газов. Для утилизации избыточного тепла, выделяющегося при сжигании ОСВ, предусмотрен котел-утилизатор с тремя отсеками и естественной циркуляцией, который работает в автоматизированном режиме. Первый этап очистки отходящих газов состоит из удаления летучей золы на выходе из котла-утилизатора при помощи электрофилтра. Улавливаемые летучая зола и пыль собираются двумя контейнерами и подаются через лопастной затвор в специальный бункер. Транспортировка летучей золы и пыли производится сжатым воздухом по трубопроводу в соответствующий бункер хранения золы. Для выгрузки золы установлена комбинированная двойная система разгрузки, которая позволяет вести выгрузку сухой и влажной золы. После электрофилтра дымовые газы проходят через теплообменник, в котором происходит их охлаждение перед тем, как они попадают в систему противоточных скрубберов. После теплообменника отходящие газы проходят мокрую очистку в системе скрубберов, состоящей из 2-х ступеней, первая ступень – колонна кислой промывки, вторая – колонна щелочной промывки газов. В колонне кислой промывки за счет интенсивного взаимодействия орошающей жидкости и дымовых газов происходит удаление газов, образующихся кислоты, в частности,  $HCl$ , и ртути в ионной форме. На второй ступени происходит удаление  $SO_2$  при pH 5-8 за счет регулируемого дозирования раствора каустической соды (42%), поступающего из системы подготовки и подачи раствора. Кроме того, в скруббер вводится доза реагента ТМТ-15 для обеспечения связывания ртути в нейтрально-щелочной среде второй ступени. Орошающая жидкость непрерывно циркулирует при помощи насосов. Вытяжной вентилятор подает очищенные и нагретые отходящие газы в дымовую трубу, предусмотренную для каждой технологической линии, через которую газы выбрасываются в атмосферу. Для использования перегретого пара высокого давления он подается с двух котлов-утилизаторов на общую паровую турбину, которая подсоединена к электрогенератору. На выходе из турбины давление пара составляет 7 бар. Такой пар может использоваться для производства горячей воды для централизованного теплоснабжения, для регулирования температуры в установке водоподготовки для котла, для предварительного подогрева воздуха для сжигания в паровом воздухонагревателе. При сжигании ОСВ образуется большое количество тепла, которое планируется использовать в теплоснабжении и для выработки дополнительной электроэнергии.

Французская фирма «Veolia» планировала в 2006 г. приступить к строительству завода по сжиганию осадков городских сточных вод на Северной станции аэрации г. Санкт-Петербурга (в поселке Ольгино) [45]. Производительность завода составит 122,4 т ОСВ (на сухое вещество) в сутки.

Сжигание ОСВ на станциях аэрации ограничивает разнообразие возможных технологических приемов как в очистке сточных вод, так и в обработке ОСВ [15]. В технологии очистки сточных вод применение реагентной обработки становится нежелательным ввиду повышения зольной части осадка, т. е. как это негативно отразится на процессе их сжигания. В данном случае была выбрана технология безреагентного биологического удаления азота и фосфора из сточных вод, обезвоживания и сжигания сырых нестабилизированных осадков.



Система термической обработки ОСВ (две технологические линии) включает сжигание получаемых на ССА и ввозимых из других станций обезвоженных ОСВ (кека), ликвидацию пены, жиров и нефтепродуктов, уменьшение количества отходов, вывозимых на принадлежащий ССА полигон «Северный» [15]. Основное технологическое оборудование цеха термической обработки осадка (для одной линии):

- печь «Pyrofluid» типа R72 (аналогичная печам ЦСА г. Санкт-Петербурга) с псевдоожиженным слоем (песок);
- рекуператор тепла (для нагрева воздуха псевдоожижения);
- котел-утилизатор тепла;
- система сухой газоочистки (электростатический фильтр, рукавный фильтр).

В двух печах сжигаются ОСВ (54-122,4 т/сут сухой массы), жиры (3,8 т/сут), отходы с решеток (2,4 т/сут). Дымовые (отходящие) газы в процессе газоочистки поступают в электрофильтр, затем в смеситель, где в дымовые газы добавляется охлаждающий воздух, содержащий активированный уголь и гидрокарбонат натрия. Эффективность очистки сухим электростатическим фильтром составляет более 99%. Электростатическим фильтром удаляются вместе с золой тяжелые металлы, а также до 10% ртути. Зола собирается в два приемных бункера, из которых затем пневмотранспортом направляется в бункер хранения. Каждая линия работает полностью независимо от другой. Сухая очистка дымовых газов осуществляется в рукавных фильтрах. Удаление кислотных газов обеспечивается вводом гидрокарбоната натрия. Оставшаяся часть ртути удаляется специальным методом путем введения активированного угля (одновременно с гидрокарбонатом натрия). После введения в охлажденные дымовые газы гидрокарбоната натрия и активированного угля для удаления указанных побочных продуктов перед выбросом газа в атмосферу применяют рукавные фильтры с эффективностью очистки более 99,9%. Топочный газ удаляется вентилятором и выбрасывается через дымовую трубу в атмосферу. Остаточные содержания вредных веществ отвечают требованиям Директивы 2000/76 ЕС по сжиганию отходов.

Строительство заводов позволит к 2008 г. перерабатывать (сжигать) 98% ОСВ, образующихся на очистных сооружениях г. Санкт-Петербурга. В частности, сегодня только на полигоне «Волхонка» складировано 2,5 млн. м<sup>3</sup> ОСВ, а ежегодная потребность в новых участках под складирование вновь образующихся ОСВ составляет 8-10 га в год [52]. В расчете на одного эквивалентного жителя приходится примерно 40 г осадка первичных отстойников и около 30 г избыточного активного ила в сутки.

Есть сведения, что МУП «Водоканал» в г. Йошкар-Оле может стать вторым в России предприятием, где будет построен завод по сжиганию ОСВ [44].

#### Утилизация отходов, образующихся при сжигании ОСВ

При сжигании ОСВ образуются зола и жидкие шламы скрубберных установок, которые в свою очередь могут быть классифицированы как опасные отходы, что обуславливает необходимость их безопасной утилизации. В ряде случаев зола и шлак от сжигания ОСВ могут быть пригодны для вторичного использования в строительстве, сельском хозяйстве и пр. [13].

Например, в Японии выполнены исследования целесообразности использования в качестве удобрений сельскохозяйственных почв золы, получаемой при сжигании при температуре 800°C ОСВ, образующихся на очистных станциях г. Саппоро [47]. Установлено, что при сжигании ОСВ, содержащиеся в них тяжелые металлы переходят в золу в нерастворимой форме, а эффективность усвоения почвой азота и фосфора из золы больше, чем из «свежего» осадка. Анализ состава овса

показал, что при использовании золы вместо ОСВ концентрация меди в нем практически не изменяется, а содержания марганца, цинка, свинца и кадмия даже уменьшаются.

В США исследовалась возможность использования отходов инсинерации (сжигания) для создания искусственных рифов [38]. Отходы инсинерации, содержащие тяжелые металлы, смешивались с цементом. Отлитые из этого материала блоки через 6 месяцев сохраняли свою целостность в море, а металлы, входящие в состав блоков, надежно консервируются в них. У животных, заселяющих искусственные рифы, не обнаружено повышенных концентраций тяжелых металлов.

Зола, образующаяся при совместном сжигании мусора и ОСВ, используется в качестве составляющей сырьевой смеси для производства так называемого эконоцемента, который не содержит хлористых соединений, и поэтому имеет гораздо меньшее ограничение на применение [40].

В настоящее время в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» решается вопрос утилизации золы, образующейся в процессе сжигания осадков сточных вод [54]. В частности, за время работы завода по сжиганию ОСВ (на о. Белый) ее уже накопилось более 100 тыс. т. При хранении золы на полигоне в воздухе его санитарно-защитной зоны наблюдаются превышения ПДК пыли более чем в 5 раз [22]. Было проведено изучение возможных направлений использования и переработки золы, а также выполнены исследования по ее дожиганию в пилотных электропечах. Среди основных направлений утилизации золы определены следующие [14, 22, 54]: высокотемпературный обжиг золы; получение безобжигового гравия; использование золы в дорожном строительстве; производство ячеистого пенобетона, производство керамического кирпича.

#### Другие способы термической обработки ОСВ

Кроме сжигания, получившего наибольшее распространение, основными способами термической обработки ОСВ являются сушка, пиролиз, газификация, термохимическая конверсия (процесс, близкий к пиролизу), термохимическое ожигание [5]. Последние два способа, разработанные в Австралии, позволяют получать жидкое нефтеподобное топливо. Весьма ценные продукты образуются при пиролизе и особенно при газификации, которые используются как сырье в химической промышленности. Термическая сушка механически обезвоженных ОСВ позволяет существенно уменьшить их объемы, получить обеззараженный, внешне сухой (влажность 10-15%) сыпучий продукт, в котором сохраняются органические вещества, являющиеся ценным компонентом удобрений. Известны различные способы термической сушки ОСВ. Одним из вариантов новых сушильных аппаратов является разработанная в Германии ленточная сушильная установка. Она состоит из одной или нескольких расположенных друг над другом лент, на которых размещается направляемый на сушку осадок. В зависимости от температуры применяют ленты из искусственных волокон или металла с отверстиями. Во время сушки ленты с обезвоженными ОСВ медленно движутся в сушильном объеме, а перпендикулярно плоскости лент через них и осадок проходит забирающий влагу поток теплого воздуха. Такой способ сушки исключает пылеобразование, а следовательно, взрывоопасность; время сушки 1 час, потребление энергии 830-950 кВт-ч/кг [5].

В настоящее время пиролиз и газификация рассматриваются как наиболее перспективные технологии переработки биомассы, причем многие специалисты даже связывают с ними энергетику будущего [16]. Преимуществами этих способов является получение топлива, пригодного к транспортировке, которое может использоваться для получения как тепловой, так и электроэнергии. Использование пиролиза и газификации позволяет получать из биомассы горючий газ, уголь, жидкое синтетическое топливо и сырьевые продукты для химической промышленности, а остатки процесса преобразовать в экологически безопасный гранулированный остеклованный продукт, который может использоваться в дорожном строительстве, промышленности строительных материалов.

По данным [7], к началу 1980-х гг. за рубежом насчитывалось около 300 действующих пиролизных установок по переработке отходов. Наибольшее число пиролизных заводов было построено на базе твердых бытовых отходов, намного меньшее количество работало на смеси бытовых отходов с ОСВ и совсем мало установок перерабатывало только ОСВ. В США, ФРГ, Японии созданы установки для пиролиза ОСВ в смеси с ТБО и промышленными отходами [9]. Считается, что утилизация ОСВ путем их пиролизной переработки открывает новые возможности перспективного использования всех осадков, особенно в тех случаях, когда по содержанию вредных веществ не представляется возможным их использование в качестве удобрения или кормового продукта.

Пиролиз, или сухая перегонка, представляет собой процесс термической переработки ОСВ или других углеродсодержащих отходов путем высокотемпературного нагрева без доступа воздуха [7]. В результате такой переработки ОСВ получают по отношению к абсолютно сухим веществам около 50% твердых остатков (уголь, полукокс, или пирокарбон), примерно 25% жидких продуктов (смола или первичный деготь) и 12-15% смеси газообразных продуктов. Наиболее ценными продуктами пиролиза являются пирокарбон и смола, или деготь. При современных технологических разработках они являются целевыми продуктами или полупродуктами для дальнейшей химической переработки.

В СССР первые исследования процесса пиролиза ОСВ были проведены в 1930-х гг., в результате которых разработаны различные технологические схемы пиролиза с получением пирокарбона, первичного дегтя, газа, технического воска, активированных углей как сорбента. Имеются также разработки по совместному пиролизу осадков с другими отходами (получение воска из торфа и ОСВ). Совместный пиролиз ОСВ с другими отходами с целью получения полезных продуктов представляется очень перспективным по следующим причинам [7]:

1. Решается комплексно проблема удаления, обработки и использования не только ОСВ, но и других отходов.

2. При смешении ОСВ с другими отходами в последних, как правило, увеличивается содержание органических веществ, что положительно отражается на выходе полезных продуктов.

3. При смешении ОСВ с отходами меньшей влажности упрощается обезвоживание и сушка общей массы. По отношению к осадкам, обезвоживание которых обычно протекает сложно и дорого, добавка даже части других дробленых отходов исключает необходимость обезвоживания осадков или смеси отходов.

4. Совместная пиролизная обработка и использование ОСВ с другими отходами рационально решает не только экономическую, но и важную экологическую задачу.

Немецкие специалисты считают низкотемпературный (до 400°C) пиролиз особенно перспективным способом переработки отходов [7]. Особенность низкотемпературного пиролиза заключается в том, что перерабатываемое вещество переходит в нефть вначале в газообразном состоянии и лишь после конденсации стекает в виде жидкой нефти. Положительным здесь является и то, что при невысокой температуре пиролиза исключается опасность улетучивания токсичных металлов, содержащихся в ОСВ. Многочисленные опыты показали, что практически любые ОСВ можно использовать для получения сырой нефти, при этом 2/3 углерода, содержащегося в них, превращается в горючий продукт, схожий с природной нефтью. В этом направлении проводится большая исследовательская работа, выполняемая лабораторией Штутгартского университета на опытном предприятии. Опыты лаборатории показали, что выход сырой нефти из ОСВ равен от 20 до 32% от массы исходного сухого осадка. Содержание углерода в этой нефти составляет 70-82%, что равнозначно выходу нефти из 1 т сухого осадка около 300 л. При нормальном процессе пиролиза с температурой 250-300°C часть биомассы превращается в углеводороды с высоким содержанием водорода. Получаемая при этом сырая нефть содержит около 80% углерода и отличается высокой теплотвор-

ной способностью – до 8800-10000 ккал/кг. По весьма незначительному содержанию серы (от 0,05 до 1,2%) сырая нефть из ОСВ не уступает лучшим сортам природной нефти. Избыток азота в нефти из ОСВ может быть удален в виде солей аммиака в процессе промывки. Экономичность промышленного получения сырой нефти из ОСВ подтверждается и тем, что при низкотемпературном пиролизе отпадает вопрос о добавлении катализатора. ОСВ содержат 30-45% силикатных веществ и часто активную медь, используемую как катализатор. Таким образом, эти естественные катализаторы позволяют добиться удовлетворительных результатов пиролиза без введения специальных добавок.

Перспективным способом является и пиролиз, который проводится при высокой температуре в отсутствие кислорода, в результате чего происходит не сгорание отходов, а распад молекул (крекинг) на мономерные и олигомерные органические соединения, которые в принципе можно использовать для проведения химического синтеза [12].

Немецкой фирмой «NOELL-DBJ» (г. Фрейбург) разработан способ газификации ОСВ в техническом кислороде при 750°C, испытанный, который позволяет вместе с осадками утилизировать бытовой мусор и отработанные автомобильные шины [13]. Полученный в ходе газификации газ может использоваться для получения электроэнергии, для подачи в сеть газоснабжения, в качестве сырья для химического производства. Отходы от газификации ОСВ (остеклованный шлак) подлежат захоронению. В Японии фирма «Ишикаваяма-Харима Хэви Индустри» разработала проект плавучего завода, осуществляющего методом пиролиза переработку смешанных бытовых и промышленных осадков сточных вод с целью получения жидкого топлива (сырой нефти), которое используется для получения электроэнергии и опреснения морской воды [7]. Авторы цитируемой работы приводят информацию о том, что многие пиролизные установки для переработки вторичного сырья, разработанные японскими фирмами, экспортируются в западноевропейские страны и США.

В работе [55] описана система обработки осушенного осадка (65% сухого вещества) путем нагрева при 450°C в отсутствие кислорода при давлении чуть выше атмосферного, в результате чего 50% осадка переходит в парообразное состояние. Пары подвергаются каталитической конверсии в присутствии древесного угля. В результате получается 200-300 л нефти на каждую тонну сухого вещества.

В Японии с целью изучения условий пиролиза обезвоженного осадка в печи, а также условий подавления образования шестивалентного хрома и снижения его содержания в золе проводились эксперименты на полувыводной установке [57]. В экспериментах использовали три вида кека, полученных обезвоживанием осадка с помощью полимерных коагулянтов, и один кек, обезвоженный с помощью хлорида железа и извести. Пиролиз осуществляли при температуре 580-795°C, нагрузке по кеку 121-268 кг/ч и коэффициент избытка воздуха 0,56-1,10. Установлено, что содержание  $\text{Cr}^{6+}$  в образующейся золе зависит от коэффициента избытка воздуха. Для того чтобы это содержание было ниже 10 мг/кг, пиролиз кека, обезвоженного полимерными коагулянтами, следует производить при коэффициенте порядка 1,0, а кека, обезвоженного известью, при значительно меньших значениях коэффициентах.

Пиролиз и газификацию пока еще следует считать неконкурентоспособными в экономическом плане, что во многом определяется тремя факторами: отсутствие четкой политики в распоряжении отходами, наличие свободных земель для захоронения отходов; низкие цены на электроэнергию [16]. Существуют и другие факторы, например, наличие специально подготовленного вторичного топлива из отходов, относительно высокие цены на продукты газификации и произведенную с их использованием энергию, затраты на предотвращение вредных выбросов в атмосферу и захоронение золы и шлаков. В частности, в США масштабные исследования по использованию пиролиза и газификации применительно к муниципальным отходам начались в 1960-е годы, с тех пор было по-

строено множество экспериментальных и промышленных установок, которые практически все к настоящему времени закрыты [16].

В последние годы в России созданы модульные установки термической утилизации осадков сточных вод серии «UniTU» производительностью до 8 м<sup>3</sup>/сут по осадку фактической влажности, основой которых является установка утилизации отходов, разработанная в ОАО «ЭНИН им. Г.М. Кржижановского» [27]. В основу технологии, применяемой в установках данной серии, положен принцип непрямого, двухступенчатого сжигания, включающий предварительное термическое разложение органической составляющей отходов в бескислородной атмосфере (пиролиз), сжигание газообразных продуктов (с использованием выделяющегося тепла на поддержание процесса) и дожиг коксового остатка. Принципиальным условием организации процесса является обеспечение обязательного прохождения всех покидающих устройство продуктов через огневую зону, т. е. обеспечение огневого обезвреживания.

В странах Западной Европы и в Японии строгие требования к захоронению мусора и дороговизна этой операции, недостаток земель для устройства новых свалок, более высокие цены на топливо и энергию вынуждают предпринимателей искать альтернативные методы использования отходов, поэтому пиролиз и газификация получили там достаточно широкое распространение и продолжают успешно развиваться. В частности, созданы и работают малые системы газификации, рассчитанные на небольшие отдаленные населенные пункты (установка производительностью 500 кг/ч известна в Италии, производительностью 250 кг/ч – в Испании, несколько установок производительностью 2 т/ч работают в Германии) [16]. Предполагается, что малые установки по данной технологии для получения жидкого продукта (большинство потенциальных потребителей ориентируются именно на жидкий продукт, так как он имеет большую энергетическую плотность) будут использоваться на коммерческих предприятиях Италии, Испании, Греции.

## Литература

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.
- 17.
- 18.
- 19.
- 20.

21.  
22.  
23.  
24.  
25.  
26.  
27.  
28..  
29. Хонда А. // Хайкибицу, 1984, 10, № 2, р. 43-47.  
30.  
31.

32. Янин Е.П. Геохимические особенности осадков сточных вод промышленного города. – М.: ИМГРЭ, 1996. – 41 с.

33. Янин Е.П. Ртуть в осадках городских сточных вод // Эколого-геохимические проблемы ртути. – М.: ИМГРЭ, 2000, с. 143–152.

34. Янин Е.П. Осадки городских сточных вод как источник поступления ртути в окружающую среду. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 26 с.

35. Янин Е.П. Осадки сточных вод городов России как источник эмиссии ртути в окружающую среду // Экологические системы и приборы, 2004, № 7, с. 14–16.

36.  
37.  
38.  
39.  
40.  
41.  
42.  
43.  
44.  
45.  
46.  
47.  
48.  
49.  
50.  
51.  
51.  
53.  
54.  
55.  
56.  
57.  
58.  
59.  
60.  
61.  
62.

63.

64.

65.

66.