

## ЧТО ЛУЧШЕ – СЖИГАТЬ ИЛИ РАЗЛАГАТЬ ТВЁРДЫЕ КОММУНАЛЬНЫЕ ОТХОДЫ?

© 2021 г. В. И. Осипов

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия*

*E-mail: osipov@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 13.04.2021 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 29.04.2021 г.

В статье проводится сравнительный анализ методов переработки и ликвидации твёрдых коммунальных отходов за рубежом и в нашей стране. Отмечается значительное технологическое отставание России в этой сфере. Анализируются известные технологии устранения отходов методом сжигания, высокотемпературного разложения, биоразложения и полигонного захоронения. Рассматриваются физические основы, преимущества и недостатки методов сжигания и разложения. Отмечается необоснованность принятого в России выбора сжигания отходов на колосниковой решётке в качестве основной технологии их обезвреживания и ликвидации. Анализируется объём не только образующихся, но и ранее сформировавшихся неотсортированных отходов (“накопленный ущерб”). Делается вывод, что для нашей страны приоритетной технологией ликвидации отходов следует считать биоразложение с применением системы дренирования и утилизации отходящих газов и загрязнённых инфильтрационных растворов.

*Ключевые слова:* сортировка, переработка и захоронение отходов, утилизируемые и не утилизируемые отходы, технологии обезвреживания и ликвидации отходов, сжигание, пиролиз, плазменная обработка, полигонная технология.

DOI: 10.31857/S0869587321080089

**Состояние проблемы.** В современном мире обращение с твёрдыми коммунальными отходами (ТКО) остаётся актуальнейшей проблемой, связанной с ростом крупных городов и накоплением мусора, а также появлением материалов (например, полиэтилена и резины), слабо поддающихся естественному разложению.

Уровень культуры обращения с ТКО определяется использованием современных технологий сбора, сортировки, переработки, обезврежива-

ния и ликвидации отходов. Их применение и сочетание формирует систему обращения с отходами (рис. 1). На схеме показаны две группы ТКО, образующиеся на урбанизированных территориях. Первая группа – отходы, претерпевшие сортировку и переработку, вторая – первичные отходы, захораниваемые без предварительной переработки. Соотношение между ними обуславливается развитием системы сортировки. На этапе сортировки выделяются компоненты отходов, которые могут служить вторичным ресурсом, пригодным для дальнейшей переработки и получения полезных продуктов. Одновременно определяются компоненты, не содержащие полезных составляющих и относящиеся к не утилизируемым.

Сортировка и переработка ТКО относятся к наиболее сложным и ответственным мероприятиям по обращению с отходами. От них во многом зависят рентабельность создаваемой системы обращения и заинтересованность бизнеса в этом виде экономической деятельности. Сортировка позволяет разделять отходы на утилизируемые и



ОСИПОВ Виктор Иванович – академик РАН, научный руководитель ИГЭ РАН.

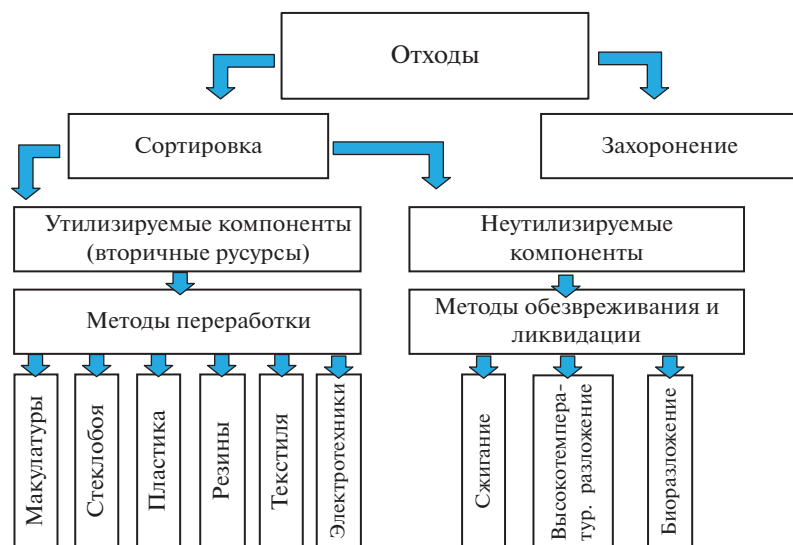


Рис. 1. Структурная схема обращения с ТКО

неутилизируемые. Отсортированные утилизируемые компоненты подразделяются по составу, а затем направляются на специализированные предприятия, где подвергаются переработке и утилизации. Тогда как неутилизируемые компоненты подлежат обезвреживанию, уничтожению или захоронению. Это достигается применением таких технологий, как сжигание, высокотемпературное разложение, биоразложение и захоронение (см. рис. 1).

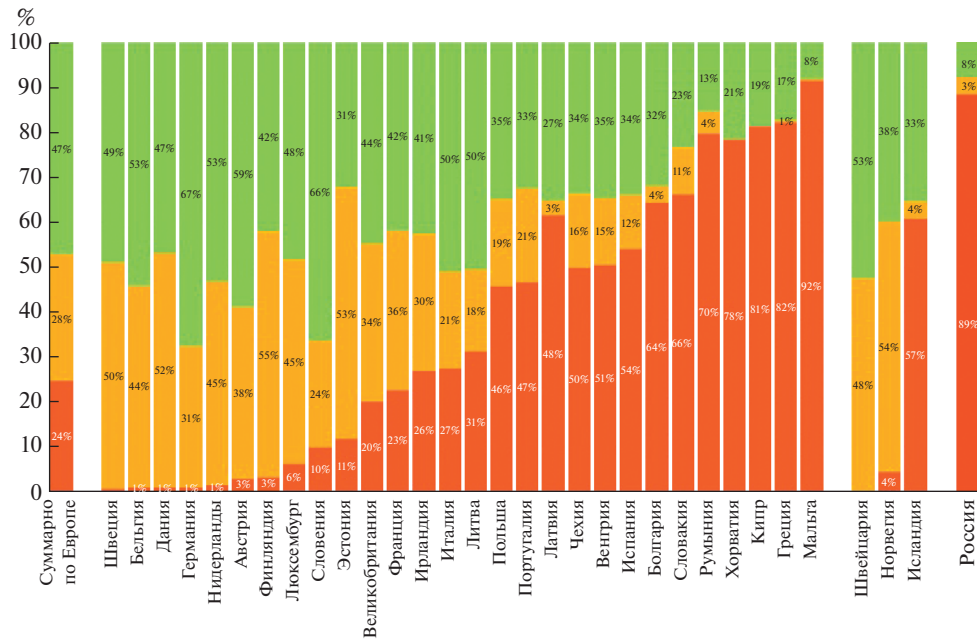
В зависимости от состава отходов и применения тех или иных технологий можно судить о научно-техническом уровне обращения с ТКО. По данным Конфедерации европейских заводов по переработке отходов в энергию (CEWEP), в ряде стран Европейского союза (Швеция, Бельгия, Дания, Германия, Нидерланды) по состоянию на 2014 г. (рис. 2) перерабатывалось, обезвреживалось и ликвидировалось более 98% ТКО, то есть эти страны достигли так называемого “нулевого сброса” непереработанных отходов. Причём переработанные отходы здесь составляли 50–68% от общего объёма ТКО: Германия (67%), Бельгия (53), Нидерланды (53), Швеция (49) и Дания (47). По обезвреживанию и уничтожению отходов (сжигание) лидирующее положение занимают Бельгия (44%), Дания (52), Швеция (50) и Финляндия (55).

Значительная часть европейских стран использует технологию захоронения в геологической среде. Меньше всего отходы захоранивают в странах, испытывающих дефицит свободных территорий (Бельгия, Дания, Нидерланды, Швеция и Германия). Наряду с этим практически половина европейских стран захоранивает более 50% отходов (см. рис. 2). Лидирующее положение среди

них занимает Россия, где объём захоронения составляет 89%.

Захоронение как основная форма обращения с отходами в нашей стране обусловливается слабым уровнем развития сортировки и переработки ТКО, а также отсутствием материальных стимулов обращения с отходами, системы экологических услуг, недостаточным учётом отходов – источника вторичных ресурсов. В результате сформировалось отношение к отходам как к непроизводительной сфере деятельности, которую можно осуществлять с минимальными финансовыми затратами без внедрения современных технологий и выполнения экологических требований. Этим объясняется разница в стоимости переработки одной тонны отходов в нашей стране и за рубежом. По оценке зарубежных специалистов, затраты на переработку 1 т ТКО с помощью современного мусоросжигательного завода составляют около 1000 евро [1], в то время как в нашей стране на эти цели направляется 1,5–2 тыс. руб.

Сравнительная характеристика свидетельствует о необходимости проведения в России срочных мероприятий для решения проблем обращения с отходами. Важную роль в этом призван сыграть национальный проект “Экология”, принятый в 2018 г., в который входит федеральный проект “Чистая страна” [2, 3], направленный на эффективное обращение с отходами производства и потребления. Согласно этому документу, Россия в ближайшие годы должна перейти на новую технологическую базу обращения с отходами. К 2024 г. доля ТКО, направляемых на переработку, должна достигнуть 60%, а направляемых на утилизацию – 36% от общего объёма. Проведение



**Рис. 2.** Обращение с ТКО в государствах Европейского союза и в России (зелёный – переработка, жёлтый – сжигание, красный – захоронение)

Источник: [https://www.cn-hw.net/uploads/allimg/180925/38649\\_180925085632\\_1.jpg](https://www.cn-hw.net/uploads/allimg/180925/38649_180925085632_1.jpg)

ны инвентаризация мест размещения отходов и анализ территориальных схем их обращения, ликвидирована 191 свалка в городах России и 75 наиболее опасных объектов ТКО накопленно-экологического вреда.

Сейчас идёт обсуждение поставленных задач. Одна из важнейших – выбор современной технологии обезвреживания и ликвидации не утилизируемых отходов. При этом рассматриваются два альтернативных подхода: сжигание и разложение.

**Сжигание.** Под сжиганием понимается процесс подконтрольного горения в условиях кислородсодержащей среды, приводящий к окислению твёрдых, жидких и газообразных веществ. Сжигание отходов используется человеком в быту с древних времён. Так, в Великобритании его начали применять для удаления мусора во второй половине XIX в. В 1930 г. в Швейцарии для промышленных целей впервые разработали печь, на основе которой была создана технология слоевого сжигания или сжигания на колосниковой решётке. Вслед за этим появились мусоросжигательные заводы (МСЗ). В 1960–1990 гг. в странах ЕС, Японии, США и Канаде было построено более 2500 МСЗ, в том числе 600 – в Европе. Это дало возможность только на европейском континенте ежегодно перерабатывать более 58.5 млн т мусора и получать 23.4 МВт энергии.

При слоевом сжигании мусор подаётся на решётку печи и обрабатывается горячим воздухом

ным потоком при температуре 850–1500°C, что позволяет сократить массу отсортированных и неотсортированных отходов более чем в 3 раза и использовать выработанную тепловую энергию.

Вместе с тем технология сжигания имеет ряд недостатков, связанных с её безопасностью. При колосниковом сжигании мусора образуется множество вредных соединений – углеводороды, хлорированные фенолы, бром- и азотзамещённые вещества, которые не присутствовали в исходном материале. Наибольшую опасность представляют содержащийся в газообразных и твёрдых продуктах переработки диоксин – сильнейший яд, чрезвычайно вредный для человеческого организма, который способствует возникновению онкологических заболеваний, угнетает иммунитет и репродуктивные функции. Более того, образующиеся при сжигании шлак и пепел могут загрязнять почву и воды мышьяком, свинцом, кадмием и другими тяжёлыми элементами. Это исключает их утилизацию и требует захоронения на специальных полигонах.

Диоксины и фураны, обладающие высокими токсичными свойствами, образуются при неполном окислении ароматических углеводородов. Допустимый уровень их содержания в выбросных газах, принятый в нормативных документах различных стран, незначителен:  $10^{-9}$ – $10^{-12}$  г/м<sup>3</sup>. Активность диоксинов и фуранов резко возрастает при наличии в газовых выбросах хлора, брома, фтора и йода. Поэтому присутствие в отходах

хлор- и фторсодержащих пластиков, а также мышьяка, цинка, ртути, свинца и других легкоплавких металлических соединений повышает опасность выбрасываемых газов.

Диоксины в воздухе могут вызывать массовое поражение людей. Впервые это выяснилось во время войны во Вьетнаме (1965–1971). В ходе американской бомбардировки этой страны в результате выброса в атмосферу 170 кг диоксида на площади 300 тыс. км<sup>2</sup> пострадало более 3 млн человек [4].

Опасные газообразные соединения вместе с продуктами неполного сгорания загрязняют окружающую среду до уровня, значительно превышающего предельно допустимые нормы. Об этом свидетельствует опыт сжигания отходов в нашей стране. Начиная с 1972 г. в СССР и СНГ по проектам Института “Гипрокоммунэнерго” в Москве, Мурманске, Владивостоке, Киеве, Севастополе и Харькове было построено 11 мусоросжигательных заводов, предназначенных для прямого уничтожения ТКО. Однако позже по требованию Госкомприроды СССР большинство из них закрыли по экологическим соображениям.

Необходимо учитывать, что диоксин – тяжёлый (более 200 а.е.м.), медленно (порядка 100 лет) разлагающийся газ, который при попадании в атмосферу быстро оседает вблизи источника выброса. По оценке И.П. Мазурина и В.В. Понуровской, в результате строительства МСЗ в Москве по проекту фирмы “Hitachi Zosen Inova” уже через 10–12 лет 80 км<sup>2</sup> площади вокруг завода может быть загрязнено выше допустимой нормы, что потребует очистки территории [5]. Это заключение подтверждается опубликованными в зарубежной литературе данными по увеличению заболеваемости раком населения, проживающего вблизи таких заводов, а также медицинскими данными токсического и генетического воздействия на человека даже относительно невысокого ( $10^{-10}$ – $10^{-12}$  г/кг) содержания диоксинов [6, 7].

Проблема распространения диоксинов приобрела особенно острый характер после их обнаружения в молоке кормящих матерей. Перед создателями МСЗ всталась задача повышения эффективности очистки продуктов горения от вредных образований. Начиная с 1990-х годов технология сжигания пополнилась новыми методами очистки газов и шлаков за счёт использования угольных и рукавных фильтров, мокрых скрубберов. Кроме того, стали применяться методы дожигания с высокотемпературным воздействием. Это дало возможность снизить концентрацию диоксинов в выбрасываемых газах. Одновременно очистка стала включать 5–8 ступеней, что привело к существенному повышению стоимости технологии сжигания. Тем не менее, несмотря на по-

стоянное совершенствование, её нельзя считать отвечающей современным требованиям экологической безопасности [1, 8–10]. Эта точка зрения нашла своё подтверждение в позиции Европейского союза, который в 2017 г. провозгласил принцип постепенного отхода от данной технологии.

В сложившейся ситуации неожиданной оказалась позиция России. Органы, ответственные за решение проблемы управления отходами, приняли неконструктивное решение о признании в нашей стране сжигания в качестве базовой технологии обращения с ТКО. В подтверждение этому в 2017 г. было подписано соглашение между государственной корпорацией “Восток” и корпорацией “Hitachi Zosen Inova” о строительстве в России четырёх МСЗ [11]. Главное, что в соглашении говорилось о поставке в нашу страну заводов с тремя ступенями очистки выбрасываемых газов. Это предприятия устаревшей серии, по техническим параметрам не соответствующие заводам, которые строят сейчас западные фирмы. Достаточно сказать, что такой завод будет выбрасывать 0.36 г диоксинов в год, что не обеспечивает необходимой гарантии по безопасности, тогда как современные заводы, работающие с 5–6 степенями очистки, выбрасывают 0.01 г диоксинов в год [12, 5]. Очевидно, нам предлагают создать сеть МСЗ устаревшей конструкции.

Нельзя не отметить и завышенную стоимость сделки. Цена одного завода составляет около 35 млрд руб., что в 3 раза выше его стоимости в Швейцарии [13, 12]. Согласно проекту “Экология”, из 70 млн т отходов, ежегодно образующихся в России, примерно 30 млн т в результате сортировки будут отнесены к не утилизируемым, что потребует их обезвреживания с применением сжигания. При ежегодной производительности МСЗ до 650 тыс. т для этого предстоит построить не менее 50 заводов. С экономической точки зрения реализация такого проекта в ближайшие годы трудновыполнима.

Таким образом, технология сжигания отходов на колосниковой решётке с трёхступенчатой системой очистки, предлагаемая зарубежными фирмами, не соответствует современному уровню научно-технического прогресса и не обеспечивает необходимую экологическую безопасность.

В последнее время часто приходится слышать, со ссылками на зарубежные СМИ, заявления о безопасности применения мусоросжигательных заводов. Безусловно, следует учитывать, что МСЗ в европейских странах обеспечивают более высокую очистку от вредных компонентов по сравнению с предлагаемыми нам заводами. В то же время даже самые современные МСЗ нельзя считать безопасными [14]. Невозможно не учитывать и

присущий западным СМИ определённый коммерческий интерес. В их публикациях мусоросжигательный завод часто преподносится как одна из главных достопримечательностей Вены, Парижа, Кельна и Копенгагена (в столице Дании, например, крыша завода оборудована как горнолыжный спуск) [15].

**Пиролиз и плазменная обработка.** Сегодня в качестве альтернативы сжиганию разрабатываются технологии, основанные на термическом разложении перерабатываемых материалов. Их особенностью заключается в преобладании реакций восстановления над реакциями окисления. Под действием температуры в обрабатываемых материалах разрушается их стабильная атомно-молекулярная структура и происходит диссоциация. При этом тяжёлые молекулы захватываются расплавом силикатов, образующих базальтоподобную массу, а лёгкие атомы и молекулы возгоняются в виде синтез-газа. Термические условия исключают синтез, генерацию и рекомбинацию супертоксикантов (диоксинов и фуранов). Иными словами, применение термических технологий практически исключает выбросы в атмосферу опасных газов и полностью предотвращает образование загрязнённых шлаков, золы и пепла.

Наибольшее распространение среди методов деструкции получил пиролиз. Процесс основан на температурной обработке отходов при отсутствии кислорода. Получаемый при этом новый продукт – синтез-газ – используется в энергетике и химической промышленности. Пиролиз относится к одному из перспективных методов уничтожения отходов, содержащих трудно поддающиеся деструкции компоненты – пластмассу, автотопрышки, медицинские отходы.

Сущность пиролиза заключается в процессе нагревания отходов без доступа воздуха при температуре 400–600°C с разложением исходных материалов на газообразные органические вещества и твёрдый остаток. Газообразные и твёрдые остатки дожигаются (вторичная, высокотемпературная стадия газификации). Процесс идёт не менее 6 с при температуре 1200–1400°C и незначительном содержании кислорода. При таком технологическом режиме невозможен ресинтез опасных веществ типа диоксинов и фуранов. На выходе получают безвредное газообразное вещество (синтез-газ), обладающее высокой удельной теплотой сгорания, которое можно использовать в качестве топлива и сырья для химической промышленности, и твёрдый осадок, входящий в состав образующихся шлакокаменных материалов. Переработка отходов с применением пиролиза и газификации позволяет полностью предотвращать образование опасных соединений и утилизировать продукты переработки. Поэтому В.С. Рыбальченко и И.В. Рыбальченко

относят эту технологию не к сжигающей, а к перерабатывающей [8, 16].

Таким образом, высокотемпературная обработка обладает рядом преимуществ, которые позволят ей в ближайшем будущем занять приоритетное место среди систем по обращению с отходами. Такая перспектива вызывает особый интерес у технически развитых стран с высоким уровнем урбанизации и ограниченными территориальными возможностями. Большое значение будет иметь также окончательная стоимость процесса переработки.

Высокотемпературные технологии всё шире применяются в Японии, Англии, Китае, Канаде и США. Они разрабатываются и в России. Отечественные специалисты предложили не менее 13 оригинальных разработок, некоторые из них не имеют мировых аналогов [8, 10, 13, 16, 17]. В Институте химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, НИЦ “Курчатовский институт”, Институте электрофизики УрО РАН, Институте металлургии УрО РАН и Московском институте стали и сплавов были созданы уникальные экспериментальные и полупромышленные установки производительностью от 60 тыс. до 1 млн т отходов в год [17, 16]. Наша наука и сейчас способна активизировать исследования в этом направлении. Вместе с тем удивляет, что пиролиз и плазменные технологии до сих пор не входят в государственный перечень наилучших доступных технологий, в котором приоритетное место занимает технология сжигания [8].

**Полигонная технология.** Рассмотренные технологии сжигания и температурной обработки отходов не относятся к природоподобным, поскольку в природе отходы не сжигаются и не подвергаются высокотемпературной обработке – происходит их медленное биоразложение и деструкция.

Процесс биоразложения начинается с брожения – распада органического вещества в условиях недостатка кислорода с образованием биогаза. Уход биогаза сопровождается дальнейшей деструкцией разлагающихся веществ и их распадом. Образующиеся продукты распада принимают участие в процессах синтеза и естественного оборота вещества в биосфере. Таким образом, медленно развивающийся процесс биоразложения в природных условиях постепенно приводит к уничтожению и захоронению отмерших остатков биоты.

Из-за медленного развития биоразложения все изменения, связанные с выходом биогазов, загрязнением подземных вод, синтезом новых компонентов, нивелируются самой природой и не влияют на экологическое состояние биосферы. Казалось бы, на этой основе можно разрабатывать природоподобную технологию обращения

с отходами. Однако в условиях техногенеза масштаб развивающихся процессов совсем иной. Необходимо учитывать:

- резкое возрастание объёма и состава отходов, создаваемых человеком, по сравнению с отмирающей биотой;
- образование крупных мусорных полигонов и свалок, в пределах которых интенсивность процессов биоразложения чрезвычайно велика по сравнению с естественным разложением биоты в природе;
- наличие в отходах трудноразлагающихся объектов антропогенной природы — пластика и резиновых изделий.

Образующийся при биологическом разложении биогаз на 95–98% состоит из газов, оказывающих отепляющее влияние на природу, — метана и углекислого газа. Одна тонна коммунальных отходов может служить источником образования до нескольких сотен кубических метров биогаза. Кроме того, внутри свалок часто происходит значительный подъём температуры, в результате может возникать внутреннее самовозгорание, способствующее образованию вредных соединений — альдегидов, фенолов и хлорорганики.

Таким образом, накопление продуктов биоразложения на свалках выходит за пределы ёмкости биосферы по их природной утилизации, что ведёт к росту в окружающей среде продуктов распада и ухудшению экологических условий. Для минимизации нежелательных эффектов *необходимо разработать полигонную техногенно-природоподобную технологию ликвидации отходов, в которой совмещался бы природный процесс разложения и техногенная система удаления и утилизации накапливающихся в теле свалок вредных продуктов распада.*

**Современное захоронение отходов в России.** Напомним, Российская Федерация занимает ведущее место в мире среди стран, использующих захоронение неотсортированных отходов в окружающем рельефе. Объём таких отходов составляет около 89% от всех ежегодно образующихся ТКО. Количество мусора, накопившегося в стране за предыдущие годы, неизвестно. Ориентировочно его накопилось от 3 до 10 млрд т при ежегодном пополнении на 70 млн т. Общая площадь полигонов и свалок ТКО — более 150 тыс. га [2]. Большинство свалок располагается вблизи населённых пунктов (58%), водоохраных зон (16%), на землях сельскохозяйственного назначения (15%) и лесного фонда (8%).

Отходы размещаются на специальных полигонах, открытых площадках и свалках, не защищённых от выпадающих осадков и других внешних воздействий. Накопление мусора идёт в различных природных и техногенных неровностях рельефа: врагах, заброшенных карьерах, на загряз-

нённых производственных территориях и других неудобьях, как правило, без учёта природных условий. Это приводит к нарушению экологических требований, загрязнению почв и горных пород, атмосферного воздуха, подземных вод — важнейших жизнеобеспечивающих ресурсов биосферы.

Основная проблема, возникающая при современном захоронении ТКО в России, заключается в отсутствии научного и законодательного обоснования мест их размещения и изоляции в природной (геологической) среде. Такие мероприятия плохо планируются, поэтому часто носят стихийный характер. Необходимо позаимствовать имеющийся в нашей стране опыт по созданию полигонов I и II уровня опасности, предназначенных для радиоактивных отходов. Казалось бы, что с учётом этого опыта можно было бы разработать технологию полигонного хранения ТКО, тем более что коммунальные отходы менее опасны, чем радиоактивные, а периоды их разложения и захоронения несравнимы с продолжительностью радиоактивного распада. Кроме того, весьма ценную информацию можно извлечь из СНИП 2.01.28-85 “Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов” [18].

**Теоретические основы полигонной технологии.** Существующая в России практика захоронения отходов практически не опирается на современные научно-технические требования. Захоронения сейчас в основном используются для сокрытия разбрасываемого мусора путём его закапывания в грунт. Такие мероприятия не способствуют достижению природоохраных целей, скорее, наоборот, приводят к образованию постоянно действующих очагов загрязнения окружающей среды. Этим объясняются многочисленные заявления учёных, специалистов и представителей общественности с требованием пересмотреть политику захоронения.

Научное обоснование полигонной технологии подземного захоронения отходов базируется на всестороннем знании геологической среды — геодинамики, литологии, гидрогеологии и геоморфологии. На основе этого до начала проектирования осуществляют два важных мероприятия. Первое — районирование территории по природным условиям размещения отходов [19–21] и второе — поиск на основе карты районирования участков, наиболее пригодных по геологическим условиям для создания полигонов. На определённых таким образом перспективных участках в дальнейшем проводятся инженерно-геологические изыскания с целью оценить показатели грунтовых массивов, используемые в ходе проектирования сооружения.

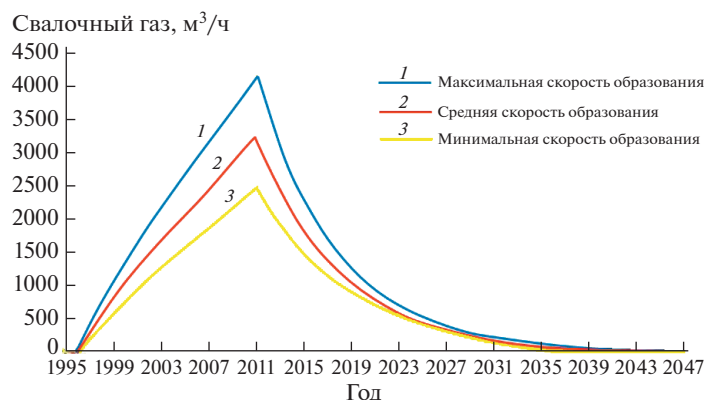


Рис. 3. Прогноз образования биогаза (свалочного газа)

При создании подземного полигона следует учитывать ряд обстоятельств:

- рассматриваемая технология должна быть ориентирована на разложение и захоронение отсортированных отходов, из которых выделены компоненты, относящиеся к вторичным ресурсам; вместе с тем полигонная технология может быть применена для ранее сформировавшихся, уже залежавшихся отходов из неотсортированного мусора (накопленный ущерб) в ходе их реабилитации;

- для безопасности полигона захоронения необходимо, не нарушая процесса разложения, организовывать постоянно действующую систему сбора и утилизации биогенного газа и загрязнённого фильтрата;

- не исключено, что при разложении отходов их температура будет возрастать – это может привести к выделению, помимо биогаза, других газообразных образований, вплоть до диоксида; в таком случае потребуются более сложная система дренирования толщи отходов; может возникнуть потребность создания запаса холода на полигоне в зимнее время через систему дренирования;

- полигон должен существовать в течение всего длительного природного процесса разложения. По экспериментальным данным (международный российско-германский проект “Климатически нейтральное обращение с отходами в Российской Федерации”, доклад Г. Хайнца<sup>1</sup>), в полигоне захоронения отсортированных отходов максимальный объём биогаза образуется через 16 лет после прекращения поступления материала, а через 45–50 лет его выделение практически заканчивается (рис. 3).

<sup>1</sup> <http://www.otxod.com/files/materials/%D0%93%D0%B5%D1%80%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82%20%D0%A5%D0%B0%D0%B9%D0%BD%D1%86.pdf>

**Геоэкологические требования к участку размещения полигона.** В основе создания безопасного полигона по размещению и ликвидации ТКО лежит ряд принципов, представляющих теоретическую основу полигонной технологии. Одним из них следует считать предотвращение контактирования тела свалки (изоляция) с элементами окружающей среды. Это достигается путём размещения полигона в геологическом массиве, сложенном породами с высокими изоляционными характеристиками, которые создают природные барьеры (экраны), препятствующие взаимодействию отходов с атмосферой, поверхностными и подземными водами. Важно добиваться всесторонней изоляции тела отходов – с поверхности, основания и бортов. Необходимо создавать своеобразный мешок, в котором отходы находились бы в замкнутом пространстве [19]. Данное условие достигается за счёт принципа многобарьерной защиты, применяемого при наличии в массиве пород, которые в силу своего литологического состава, трещиноватости или структурной неоднородности не обладают достаточными изоляционными свойствами. В этом случае помимо природных применяются искусственные (техногенные) барьеры: непроницаемые плёнки, глинистые маты, песчано-цементные растворы.

К важнейшим принципам использования полигонной технологии относится создание системы дренирования биогаза и загрязнённых вод, накапливающихся в теле отходов, которые показаны на общей схеме безопасного полигона для обезвреживания и захоронения ТКО (рис. 4). Эти сооружения могут быть нестандартными. Важно, чтобы они входили в состав инфраструктуры полигона и функционировали на протяжении всего срока его существования. Собираемый биогаз должен передаваться в действующую электросистему и утилизироваться, а фильтрационные растворы в зависимости от степени очистки мо-

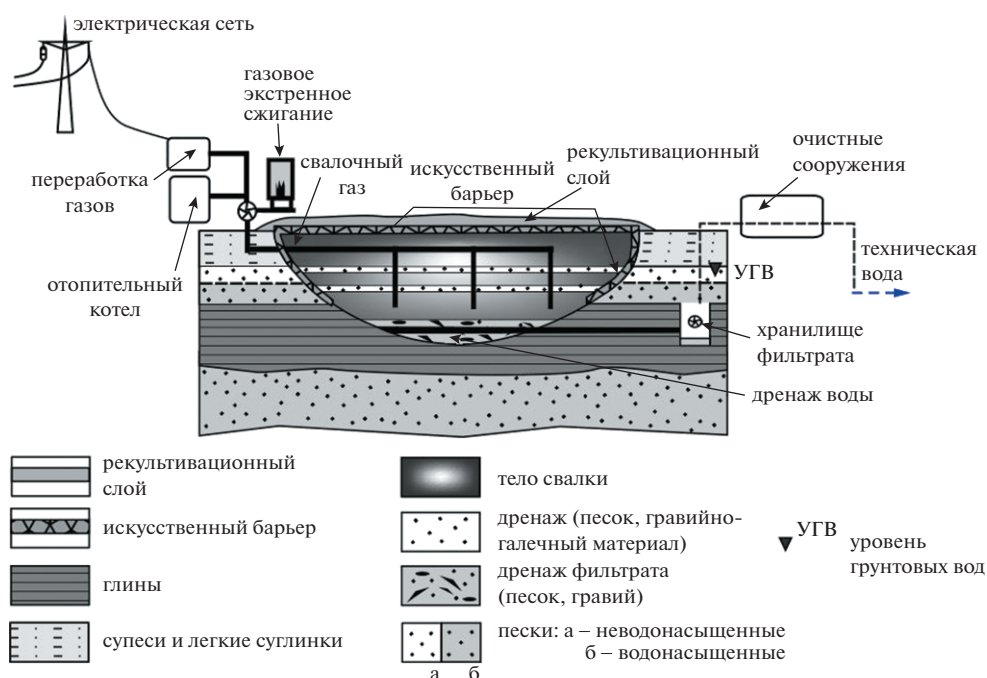


Рис. 4. Схема строения безопасного полигона в геологическом массиве

гут использоваться для хозяйственной деятельности.

Исходя из природных условий и изложенных принципов, формируются геоэкологические требования при создании безопасного подземного полигона (см. рис. 4):

- наиболее благоприятные условия для безопасного полигона создаются, когда свалочное тело находится в сплошном массиве пород с высокими изоляционными свойствами, таких как глины;
- в более сложных геологических условиях, когда породы с высокими изоляционными свойствами отсутствуют в бортах котлована, по контуру свалки необходимо создавать технический изоляционный барьер;
- при отсутствии пород с высокими изоляционными свойствами не только в бортах, но и в основании котлована создание безопасного полигона практически невозможно;
- тело свалки ТКО не должно контактировать с подземными водами;
- ТКО в котловане должны укладываться послойно и перемежаться песком или гравием;
- котлован должен быть оборудован дренажной системой для сбора и утилизации биогаза, а также сбора, удаления и очистки образующихся инфильтрационных вод;
- сверху полигон должен перекрываться слоем слабопроницаемых грунтов толщиной не менее 1.5 м;

• территория полигона не должна подвергаться действию опасных природных процессов (сейсмические, оползневые и карстовые явления, подтопление и наводнение).

**Применение полигонной технологии при реабилитации объектов накопленного ущерба.** Одна из особенностей разрешения проблемы обращения с отходами в России состоит в необходимости принятия решений относительно безвредной утилизации большого объема ранее захороненного мусора (объекты накопленного ущерба). При создании компании «Российский экологический оператор» отмечалось, что в стране имеется 5526 объектов накопленного ущерба. Сейчас ставится вопрос об их ликвидации. В национальном проекте «Экология» упоминается о закрытии к 2024 г. 75 наиболее опасных объектов накопленного экологического вреда [3]. А что делать с остальными?

При решении данной проблемы полигонная технология, в отличие от других, обладает большими возможностями. Для этого, как указано в проекте «Экология», необходимо провести инвентаризацию сформированных свалок и оценить, какие из них в ходе реконструкции можно довести до состояния, удовлетворяющего требованиям полигонной технологии, а какие нельзя. Исходя из этого решается вопрос об объектах ТКО, пригодных для рекультивации и сохранения их на прежнем месте размещения. Часть свалок, которые будут отнесены к разряду непригодных для применения полигонной технологии,



должны быть закрыты, а содержащиеся в них отходы переработаны или перемещены на другие заранее подготовленные безопасные полигоны.

Таким образом, применение полигонной технологии позволит обеспечить экологическую безопасность и в разы уменьшить затраты на создание безопасных полигонов для ликвидации вновь образующихся ТКО и реабилитацию объектов накопленного ущерба. В экологическом и экономическом отношении предлагаемая технология имеет принципиальное значение для российских условий. Сегодня её можно считать наиболее эффективной при решении вопроса обращения с твёрдыми коммунальными отходами.

\* \* \*

Исходя из требований реформирования российской экономики и учитывая научно-техническое отставание страны в сфере обращения с ТКО, необходимо пересмотреть развитие этой отрасли производства с учётом зарубежной практики, а также отечественного опыта и рынка. Стратегия управления отходами должна быть экономически доступной, социально приемлемой и экологически безопасной. Для этого необходимо проанализировать существующие технологии, определить наиболее приоритетные направления и мобилизовать научно-технический потенциал страны на их реализацию.

Широко распространённая сейчас технология сжигания отходов приводит к образованию в газообразной и твёрдой фазе продуктов сгорания опасных компонентов, включая диоксины и фураны. Применение даже самых современных методов очистки и дожигания продуктов не позволяет считать эту технологию экологически безопасной. Кроме того, она требует больших финансовых затрат. Поэтому включение сжигания в национальный проект “Экология” в качестве основной технологии обезвреживания и ликвидации ТКО необоснованно. Также недопустимо использование в России устаревших МСЗ, не отвечающих современным научно-техническим требованиям.

Температурное разложение обладает важным преимуществом перед сжиганием: оно практически исключает выбросы опасных газов и твёрдых образований, обеспечивая их утилизацию. В перспективе эта технология будет играть важную роль в развитии систем по уходу за ТКО. Она представляет наибольший интерес для стран с высоким уровнем урбанизации и ограниченными территориальными возможностями. Важное значение будет иметь окончательная стоимость технологии.

Сейчас в России к наиболее распространённым способам ликвидации отходов относится за-

хоронение, приводящее к массовым нарушениям экологических требований и снижению качества жизни людей. Это объясняется тем, что захоронение носит стихийный характер, не имеет необходимого научного обоснования, разработанной методической и нормативной базы. В ближайшие годы необходимо внедрить новую техногенно-природоподобную технологию на специально подготовленных безопасных полигонах, где исключается взаимодействие отходов с окружающей средой, обеспечиваются удаление и утилизация образующихся биогазов и загрязнённых фильтратов. В результате длительного функционирования таких полигонов содержащиеся в них отходы претерпевают естественное разложение и прекращают своё существование.

Несмотря на увеличение переработки, полигоны остаются неотъемлемой частью системы обращения с отходами. При научном подходе и сохранении техногенно-природоподобного принципа полигонная технология может стать основой безопасной системы обращения с отходами в России. Кроме того, она позволит минимизировать экономические затраты при обращении с вновь образующимися скоплениями отходов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мазурин И.М., Понуровская В.В., Колотухин С.П. Системный анализ задачи переработки твёрдых бытовых отходов // Вестник РАЕН. 2018. № 5. С. 76–84.
2. Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году”. М.: Минприроды России; НПП “Кодаст”, 2019.
3. Паспорт национального проекта “Экология”. <http://docs.cntd.ru/document/552233231>
4. Плужникова З., Иванникова Н. Диоксины: станет ли Россия вторым Вьетнамом? ИА REGNUM. 12 ноября 2018. <https://regnum.ru/news/polit/2517741.html>
5. Мазурин И., Понуровская В., Колотухин С. О принципиальной непригодности технологий мусоросжигания для России. <https://regnum.ru/news/innovatio/2512284.html>
6. Elliott P., Eaton N., Shaddick G., Carter R. Can incidence near municipal solid waste incinerators in Great Britain. Part 2: Histopathological and casenote review of primary liver cancer cases // British Journal of Cancer. 2000. V. 85. № 5. P. 1103–1106.
7. Garsia-Pereza J., Fernandez-Navarro P., Castello A. et al. Cancer mortality in towns in the vicinity of incinerators and installations for the recovery or disposal of hazardous waste // Environment International. 2013. V. 51. P. 31–44.
8. Рыбальченко В.С., Рыбальченко И.В. Перевод дискуссии о способах утилизации мусора из плоскости бизнес-решений в сферу научного обсуждения как важнейшая государственная задача // Экологический вестник России. 2019. № 8. С. 28–33.

9. *Жарков И.В.* Внедрять энергетику будущего или оставаться в прошлом. 2020. <https://ekogradmoscow.ru/vshody/eko-energetika/vnedryat-energetiku-budushchego-ili-ostatsya-v-proshlom>
10. *Мазурин И.М., Понуровская В.В.* Сжигание мусора несовместимо с концепцией устойчивого развития // Всероссийский междисциплинарный семинар – международная конференция геологического и географического факультетов МГУ “Система Планета Земля”. 28–31 января 2017. <https://regnum.ru/news/innovatio/2240524.html>
11. Соглашение № 118 от 06.07.2017 между Правительством Московской области и ООО “АГК-1” // Аргументы недели. № 36(578). 14 сентября 2017 г.
12. Швейцарские технологии мутировали в Подмосковье. <https://odintsovo.info/news/?id=66887>
13. *Сосновцев В.В.* Наилучшие мусоросжигательные заводы недоступны для России. <https://regnum.ru/news/polit/2453732.html>
14. *Arkenbout A.* Hidden emissions: A story from the Netherlands. Case Study. <https://zerowasteurope.eu/library/hidden-emissions-a-story-from-the-netherlands>
15. *Алексашина В.В.* Экология города. Мусоросжигательные заводы // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 4. С. 77–86.
16. *Рыбальченко В.С., Рыбальченко И.В.* Российские технологии мусоропереработки. Почему страна – абсолютный лидер в части научных достижений в области утилизации мусора – закупает технологии за рубежом? // Экологический вестник России. 2019. № 12. С. 40–49.
17. *Леонтьев Л.И.* Перспективы утилизации твёрдых коммунальных отходов РФ // Труды конгресса с международным участием и конференции молодых учёных “Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований” Техноген-2019. Екатеринбург: ИМЕТ УрО РАН, 2019. С. 18–25.
18. СНиП 2.01.28–85. Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию. М.: Госстрой СССР, 1985. <http://docs.cntd.ru/document/556794132>
19. *Осипов В.И., Мамаев Ю.А., Козлякова И.В.* Территориальное размещение полигонов твёрдых коммунальных отходов // Вестник РАН. 2020. № 6. С. 567–574.
20. *Козлякова И.В., Кожевникова И.А., Анисимова Н.Г., Иванов П.В.* Инженерно-геологическое районирование Центрального федерального округа России по условиям размещения предприятий и полигонов утилизации твёрдых бытовых отходов // Сергеевские чтения. Вып. 20. М.: РУДН, 2018. С. 74–78.
21. *Осипов В.И.* Управление твёрдыми коммунальными отходами как федеральный экологический проект // Геоэкология. 2019. № 3. С. 3–11.