



УДК 628.86.02

DOI 10.52575/2712-7443-2025-49-2-363-374

EDN TJMFTJ

Технологии утилизации отходов г. Якутска

Прохоров В.А.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова
Россия, 677013, Якутск, ул. Автоторожная, 2/4
prohorov_va@mail.ru

Аннотация. Целью данного исследования является разработка комплексной системы утилизации твердых коммунальных отходов г. Якутска. Приводится обзор федеральных и республиканских нормативно-законодательных документов по проблеме утилизации отходов, которую нельзя назвать решенной: полигон сбора городского мусора постоянно заполнен и находится в состоянии экологической катастрофы. Возрастающий объем твердых бытовых отходов требует внедрения комплексной системы управления твердыми отходами с использованием инновационных технологий их переработки. Приведено сравнительное описание применяемых технологий утилизации отходов, в том числе зарубежных аналогов с точки зрения их функционального и технологического решения. На основе экспертной оценки обоснованы технологические операции и предложены соответствующие технологии для мусоросортировочного комплекса города Якутска в ближайшей перспективе строительства. Предлагается поэтапная схема автоматизации мусоросортировочного комплекса. На основе анализа существующих технологических операций предлагается вариант автоматизированного мусоросортировочного комплекса для г. Якутска.

Ключевые слова: окружающая среда, твердые коммунальные отходы, утилизация, сортировка, захоронение, технологии утилизации отходов, автоматизация процесса сортировки

Для цитирования: Прохоров В.А. 2025. Технологии утилизации отходов г. Якутска. Региональные геосистемы, 49(2): 363–374. DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-363-374
EDN: TJMFTJ

Waste Disposal Technologies in Yakutsk

Valery A. Prokhorov

Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov
2/4 Avtodorozhnaya St, Yakutsk 677013, Russia
prohorov_va@mail.ru

Abstract. The purpose of this research is to study the state of solid municipal waste disposal in Yakutsk. The article provides an overview of federal and republican regulatory and legislative documents on waste disposal. It is shown that the legislative base on this problem is in the process of formation. The waste disposal issue in Yakutsk has not been solved so far, the city's landfill that is full already and continues to accumulate waste being in a state of environmental disaster. The author analyses relevant research papers, including foreign ones, determining the morphological composition of waste and annual volume of waste per person. These expert data are used to design technologies and determine the composition of equipment to be used. A study of state documents on environmental protection reveals the state of waste disposal volume and technologies used in the city of Yakutsk. The increasing volume of solid municipal waste requires an introduction of an integrated solid waste management system using innovative waste processing technologies. A comparative description of the applied waste disposal technologies is given, including foreign analogues from the point of view of their functional and technological solution. Based

© Прохоров В.А., 2025



on the analysis of existing technological operations, a version of an automated waste sorting facility for the city of Yakutsk is proposed.

Keywords: environment, municipal solid waste, disposal, sorting, dumping, waste disposal technologies, equipment, automation

For citation: Prokhorov V.A. 2025. Waste Disposal Technologies in Yakutsk. Regional Geosystems, 49(2): 363–374 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2025-49-2-363-374 EDN: TJMFTJ

Введение

Несмотря на стремительное развитие технологий, серьезной угрозой для современного общества, последствия которой непредсказуемы, является загрязнение окружающей среды. Одной из самых острых и масштабных проблем, связанных с ухудшением качества природной среды, является нерациональное, экологически опасное и не всегда организованное обращение с отходами. Ситуация, связанная с постоянным увеличением массы отходов потребления, приводит к серьезному загрязнению окружающей среды и создает угрозу здоровью населения [Oluwafemi et al., 2021; Цховребов, 2024]. Эта проблема актуальна для всего мирового сообщества. С ростом населения и повышением уровня потребления также увеличиваются объемы отходов. Загрязнение окружающей среды отходами в Якутии приводит к разрушению связанных элементов экосистем [Коркин и др., 2020]. Примерно одна третья часть населения республики сосредоточена в г. Якутске. По состоянию на 2022 год общий объем отходов города составляет около 1 876 044 куб. м / 281 406 т, что больше на 18,1 % по сравнению с объемами 2019 года. Но большая часть отходов все равно остается и продолжает представлять огромную угрозу для окружающей среды. В связи с этим становится актуальным вопрос сортировки отходов в Якутске, где опасное состояние окружающей среды заставляет принимать меры по экологически безопасному обращению с отходами и внедрению эффективных устойчивых методов их утилизации.

Обзор современного состояния в рассматриваемой области

Проблему утилизации отходов можно отнести к наиболее важным в современной России. Политика государства в области отходов базируется на следующих принципах: затраты обращения с отходами несет их производитель; минимизация экологического ущерба; максимальный возврат материалов и энергии. Ежегодно образуется огромное количество твердых коммунальных отходов (ТКО), порядка 350–400 кг мусора в год на одного жителя [Губанов, Красильникова, 2013; Иванова, Горбина, 2020]. Практически более 90 % отходов в России вывозится на мусорные полигоны. Только от 1 до 5 % указанного объема отходов подвергается переработке в целях получения вторичного сырья из утильных фракций ТКО.

Важную роль в практической деятельности по сохранению природной среды имеет ее правовое обеспечение. Определяющим документом в этом направлении является Указ Президента Российской Федерации «Стратегия экологической безопасности России на период до 2025 года», принятый в 2017 году. Основа стратегии заключается в том, что «высокое качество жизни и здоровья населения, а также национальная безопасность могут быть обеспечены только при условии сохранения природных систем и поддержания соответствующего качества окружающей среды». Данная стратегия является основой для принятия практических комплексных мер, направленных на снижение негативных последствий антропогенного влияния на окружающую среду. В 2018 году была утверждена «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». Кроме целевого описания в решении вопросов утилизации отходов ставится задача сокращения количества складированных отходов через их вторичное использование, внедрения и всемерной поддержки си-

стемы раздельного сбора отходов, также документ включает пункты по внедрению системы качественного экологического нормирования и инновационных эффективных технологий утилизации отходов. В стратегии одним из целевых показателей определена доля ТКО, направленных на обработку, которая должна составить 80 % к 2030 году. С 1 января 2019 года началась «мусорная реформа», которая реализуется в рамках федерального проекта «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами». С началом реформы обязанность по вывозу ТКО была возложена на региональных операторов. В этих основополагающих документах определены направления государственной политики в области обращения с отходами [Левакова, Арустамов, 2021].

В мире существует множество технологий утилизации отходов, таких как захоронение на полигонах, складирование, раздельный сбор, вторичная, биологическая, термическая переработка, компостирование, сортировка, сжигание [Yuan et al., 2022]. Сортировка ТКО может осуществляться непосредственно после их раздельного сбора или на мусороперегрузочных станциях (МПС). Наиболее широкое применение по обезвреживанию ТКО получили способы: вторичное использование, захоронение, термическая обработка, компостирование. Захоронение отходов рассматривается как исключительная мера, которая должна использоваться лишь в том случае, если отсутствуют технологии переработки и утилизации [Ofori-Agyei et al., 2023]. Захоронение на полигонах вызывает загрязнение почвы и подземных вод, является пожароопасным способом с возможным образованием вредных отравляющих газов. Чрезвычайно значимым мероприятием повышения экологического состояния в полигоне по утилизации отходов является прессование ТКО перед их захоронением на полигоне (складирование), что позволяет уменьшить объем отходов, удалить воду, затруднить доступ кислорода в плотную массу. Таким образом, прессование является эффективным процессом в системе утилизации отходов.

Представленная тема по обращению с ТКО актуальна и в Якутии, в республике управление утилизацией ТКО находится в состоянии становления, не существует комплексной системы обращения с отходами. В Якутии по данным на 01.01.2024 г. за 2023 год образовано – 860,435 млн т, что на 140,639 млн т больше чем в 2022 году. Объем образованных отходов по классам опасности составил: I класса опасности – 16 т; II класса опасности – 165 т; III класса опасности – 39139 т; IV класса опасности – 312158 т; V класса опасности – 860083956 т.

На региональном уровне основным стратегическим документом по охране природной среды является «Концепция экологической безопасности Республики Саха (Якутия)», принятая в 2002 году. Утверждена (от 6 июня 2022 года № 493-р) региональная программа Республики Саха (Якутия) «Развитие комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами в Республике Саха (Якутия) на 2022–2030 годы», где определена цель – «создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, обеспечивающей обработку ТКО в объеме 100 %, и снижение объема ТКО, направляемых на полигоны, в два раза, развитие инфраструктуры по раздельному накоплению, обработке, утилизации, обезвреживанию, захоронению ТКО, соответствующей требованиям экологического и санитарно-эпидемиологического законодательства, вовлечение отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительного источника сырья». Согласно представленным документам, поставлены очень высокие целевые показатели в решении вопросов «мусора». Там же отмечено, что «по настоящее время в республике текущее состояние не позволяет осуществить формирование комплексной системы обращения должным образом», полноценное внедрение «мусорной реформы» в республике ограничено по объективным причинам: сложная транспортная логистика, отдаленность населенных пунктов, небольшие объемы ТКО, неудовлетворительное финансовое состояние региональных операторов, низкая собираемость платежей, отсутствие инфраструктуры.

Действующий полигон захоронения отходов площадью 31,8242 га находится в 9 км от города, эксплуатируется с 1967 года. Полигон не отвечает новым экологическим нор-

мативам и требованиям, не имеет разрешительной природоохранной документации, сильно перегружен, постоянно происходит самовозгорание, продукты низкотемпературного горения выпадают на близлежащие городские кварталы, Ботанический сад, пригородные озера. Фильтрат из тела полигона содержит в большом объеме токсичные органические и неорганические загрязняющие вещества. При отсутствии необходимой гидроизоляции фильтрат попадает в почву, проникает в подземные воды и по водостокам – в открытые водоемы, отравляя источники водоснабжения.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является мусоросортировочный комплекс г. Якутска. Предмет исследования заключается в разработке предложений по утилизации отходов столицы республики. В работе использовались законодательные документы, труды российских и зарубежных ученых. Описание настоящего состояния утилизации отходов в регионе, их количественные данные получены путем анализа, обобщения материалов из государственных докладов о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия). Метод исследования основывается на использовании системного анализа, включающего методики сопоставительного и сравнительного анализа, обобщения, экспертной оценки. Использовались такие понятия (категории), как система, элемент, проблема, цель, концепция, методы, этапы. Приняты следующие базовые концепции: приоритетность сохранения биосферы по отношению к прямому использованию ее ресурсов; выявление и минимизация экологических рисков для природной среды и здоровья населения; предотвращение возможности химического загрязнения территории при внедрении новых производств и технологий.

Результаты и их обсуждение

Технологическая схема и ее обоснование

Процесс утилизации отходов напрямую зависит от решения законодательных, управленческих, экологических, финансовых, а также технологических проблем, которые рассматриваются в данной работе. В настоящее время ТКО Якутска транспортируются напрямую на полигон захоронения. Самым ответственным этапом их утилизации является сортировка. В рамках реализации комплексной программы в Якутске будет создан промышленный комплекс, направленный на обращение с твердыми коммунальными отходами, который включает полигон на 27-м км площадью 46 га, ориентировочной стоимостью 4 млрд рублей, и мусороперегрузочную станцию (МПС) с элементами сортировки на 8-м км Вилюйского тракта. Стоимость МПС определена порядка 2,368 млрд рублей. Согласно программе, комплекс будет обрабатывать 150 тыс. т ТКО с отбором до 16 % полезных фракций и утилизацией 30 тыс. т ежегодно. Стекло, пластик, картон, металл, древесина и другие полезные фракции будут отправляться на вторичную переработку. Завершен первый этап строительства нового полигона, созданы первые участки для размещения отходов (две карты из пяти). Полигон рассчитан на 132 тыс. т мусора в год. Второй этап предусматривает работы в 2024–2027 годах. Полигон будет принимать твердые коммунальные отходы только после их предварительной сортировки и прессования на мусороперегрузочной станции. Емкость полигона ограничена. Как рассчитывают заказчики, первый этап должен обеспечить эксплуатацию полигона на 10 лет. Если на каждого жителя рассчитать в среднем около 400 кг мусора при количестве жителей в среднем 400 тысяч человек, то в городе за год образуется около 160 тыс. тонн ТКО. Если, согласно республиканской программе, будет сортироваться 100 % отходов, 50 % отправится на вторичное использование, внедрится система предварительного раздельного сбора и будет организовано прессование отходов, идущих на складирование на полигоне, то срок эксплуатации может быть значительно продлен.

Обобщая вышеприведенный материал можно представить следующую последовательную схему утилизации отходов в городе: раздельный сбор на месте образования, транспортировка и сортировка мусора на мусороперерабатывающей станции с разделением части, отправляемой на вторичную переработку, выделение части, утилизируемой термическим способом, прессование части, отправляемой на складирование [Bárkányi et al., 2022]. Ниже показана комплексная схема утилизации ТКО Якутска (рис. 1), которая включает семь составляющих. В настоящее время первые три пункта утилизации отходов построены и находятся в развитии и действии. Ниже показаны примеры их реализации. Нынешняя технология утилизации ТКО города путем захоронения на полигоне должна быть заменена технологией сортировки с дальнейшим развитием, которые обозначены пунктами 4, 5, 6 и 7.

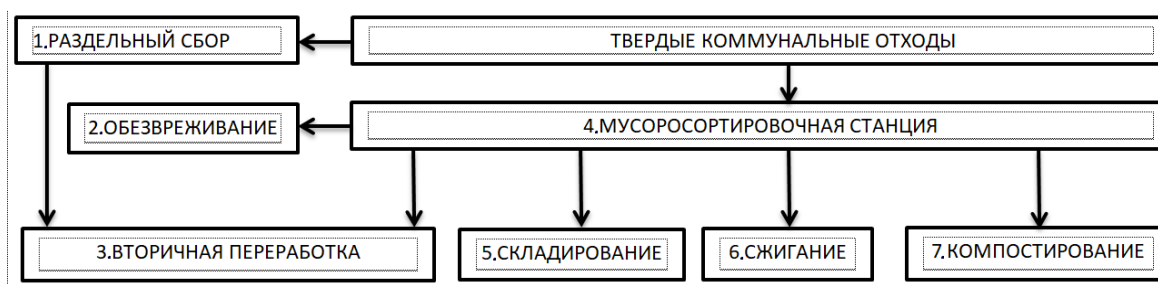


Рис. 1. Комплексная схема утилизации ТКО Якутска

Fig. 1. Integrated MSW disposal scheme in Yakutsk

По первому пункту: внедрение и популяризация системы раздельного сбора являются одними из главных положений развития отрасли сортировки и переработки отходов. На территории Республики Саха (Якутия) периодически проводятся акции, направленные на пропаганду раздельного сбора мусора. В г. Якутске в 2018 году издано распоряжение Главы ГО «г. Якутск» от 26.01.2018 № 115 «Об организации раздельного сбора отходов на территории городского округа «город Якутск»», согласно которому «всем структурным подразделениям поручено организовать раздельный сбор макулатуры, пластиковых отходов и целлофановой пленки в специально отведенные места». В Якутске переработка вторсырья начинает развиваться, пока не пользуется высоким спросом из-за малости объема конкретного вторсырья, высокой стоимости технологических устройств, низкой экономической привлекательности для бизнеса, недостаточности государственного и общественного понимания и поддержки. Отобранное вторсырье в основном отправляется для переработки за пределы республики. Транспортно-накладные расходы транспортировки вторсырья в европейскую часть России занимают значительную долю затрат, что определяет нерентабельность сортировки. Данная проблема сдерживает развитие частных производств по сбору и переработке вторсырья. Постепенно в Якутске формируется общество осознанного потребления, что является важным критерием формирования экологической культуры, без которой невозможно полноценное решение экологических проблем города. Сбором и переработкой в городе направлены занимаются ООО «Якутская экологическая компания», ИП «Петров Е.Н.», ООО «Экопартнер» и ООО «Новые экологические технологии». Приведем пример деятельности предприятий.

Более сформированным и рекламно-раскрученным из них является ООО «Якутская экологическая компания». Раздельный сбор производится по таким составляющим, как стекло и картон, пакеты, батарейки, крышки, пластиковые карты, зубные щетки и тюбики, шины, ПЭТ-бутылки, алюминиевые банки. На территории города 66 пунктов сбора вторсырья, которые установлены в жилых кварталах, в помещениях учебных заведений и других организациях. Также работает пункт приема вторичного сырья на территории предприятия, где из части переработанного пластика изготавливаются скамейки и тротуарные



плитки, устойчивые к погодным условиям и долговечные. Применяется следующая технологическая схема: собранная пленка-полиэтилен сортируется по цветам и отправляется в дробилку; измельченная пленка смешивается с речным песком в пропорции 1/4 и добавляется пигмент; готовая смесь загружается в печь, где пластик плавится, образуя единую массу; масса отправляется на формы. Следующий пример – ИП «Петров Е.Н.» занимается сбором, транспортированием, обезвреживанием, обработкой и утилизацией отходов 1–4 классов опасности [Лисанги, 2020]. На предприятии обезвреживание отходов происходит с использованием технологичного оборудования, такого как установка пиролизного типа «Фортан», установка сжигания отходов «Форсаж», установка термической утилизации отходов «Инсинератор-B-1500».

Основным этапом утилизации ТКО является сортировка. В работе Л.Я. Шубова [2012] приведен анализ условий применения и схем механической сортировки отходов, применяемых в европейских странах. Отмечено, что применяемые технологии зависят от целевого назначения, морфологического и гранулометрического состава, влажности. Автоматизация сортировки отходов в России находится в состоянии развития. Автоматизированные комплексы сортировки построены и действуют в крупных городах. Мусороперегрузочная станция была построена в г. Хабаровске и введена в эксплуатацию в 2009 году [Мищенко, 2023]. Она имеет следующие технологические элементы: линию сортировки, состоящую из конвейеров, дробильную машину мощностью 1 т/час, прессы для различных фракций отходов. Извлечение отходов на вторичную переработку составило 12 %, сортировка осуществлялась вручную. В последнее время идет планирование реконструкции мусоросортировочного комплекса с полуавтоматической сортировкой из двух линий, который также будет включать следующее технологическое оборудование: разрыватель пакетов, барабанный грохот, оптический сканер, баллистический сепаратор. По мнению автора, по принятой технологии на захоронение должно быть отправлено около 80 % отходов, на вторичное использование – 18 %, что не соответствует современным требованиям и рекомендуется повысить степень автоматизации комплекса. Автоматизированный мусоросортировочный комплекс (АМСК) стоимостью 1,2 млрд рублей введен в эксплуатацию в Костроме в 2016 году [Мальцева, 2017]. Накоплен большой опыт функционирования, с начала введения в работу АМСК постоянно модернизируется, совершенствуются технологии. Отбор полезных фракций отходов составляет 20 %, органических фракций – 30 % и фракций на альтернативное топливо – 25 %.

Мусоросортировочные линии представляют собой конвейер и состоят из различных видов технологического оборудования, предназначенного для сортировки мусора. Каждый агрегат обладает индивидуальными техническими характеристиками и предназначен для выполнения определенных действий. В зависимости от возможностей и поставленных задач линии комплектуются соответствующим оборудованием. Есть два вида мусоросортировочных комплексов: автоматизированный и с ручной сортировкой (полуавтоматизированный). По сравнению с ручной сортировкой автоматизированная сортировочная линия позволяет повысить процент отобранных фракций, а также увеличить скорость сортировки отходов [Mukherjee et al., 2021]. Минимально необходимый оптимальный состав линии может включать следующие технологические операции: приемку ТКО, предварительную сортировку, дробление, разделение на фракции, разрывание пакетов, сепарацию, прессование.

Приведем краткий анализ функций и технических характеристик основных технологических агрегатов в соответствии с технологическими операциями. Изъятие крупногабаритных предметов (металлические, деревянные конструкции, мебель, корпуса оборудования, холодильников, печей и другие) проводится на начальном этапе с применением автоматизированных устройств или ручным способом. Для автоматизации подбора может применяться робототехника [Cheng et al., 2022]. В технологических схемах МПЗ применяются дробилки крупного дробления для предварительного отделения мелких фракций.

Для разделения материала по крупности на несколько сортов рекомендуется применять двухситовые гирационные или вибрационные грохоты. Далее для эффективной сортировки ТКО применяются разрыватели мусорных пакетов. Для отбора и удаления органической фракции из общего потока ТКО применяются барабанные грохоты. Устройство представляет собой барабан, внутри которого установлены шнековые направляющие. Барабанные грохота также могут выполнить отсев мелкой фракции (органика, песок, земля, камни и т. п.) и равномерное распределение материала. Ответственным этапом сортировки является сепарация, во время которой происходит выделение из отходов сырья, пригодного для вторичной переработки [Cheng et al., 2022]. Сепарация производится как в автоматическом, так и в ручном режиме. Например, магнитные сепараторы предназначены для автоматического отбора черных металлов небольших размеров из потока отходов. А для отделения немагнитных цветных металлов, таких как алюминий, медь и олово, из смешанных твердых коммунальных отходов используется вихретоковый сепаратор. В автоматизированных комплексах применяются оптические сепараторы. Поток отходов, проходя через оптический сепаратор, автоматически сканируется, определяется материал, после этого при помощи тонких, но очень мощных потоков сжатого воздуха под большим давлением отсортировывается нужный материал. Таким образом, с учетом поставленных целей и финансовых возможностей, можно ввести в эксплуатацию мусоросортировочную линию с высокотехнологичным оборудованием.

Обоснование выбора технологического оборудования

В настоящее время в Якутске ТКО в основном транспортируется напрямую на полигон захоронения. Проектируемая мусороперегрузочная станция предусматривает создание автоматизированного сортировочного комплекса с элементами ручной сортировки. С учетом того, что в начале планируется построить МПС в ручном сортировочном варианте, в условиях финансового ограничения, внедрение инновационных технологий утилизации ТКО должно произойти поэтапно. В технологии сортировки предлагается сортировочные линии компоновать по модульной схеме. Модульная система позволяет эффективно и технологично ввести в линии дополнительные технологические установки. В планируемом варианте мусоросортировочной станции технологии утилизации не представлены. В связи с этим в работе делается обоснование возможных применяемых технологий. Ниже приведены возможные технологические процессы при первичном полуавтоматизированном варианте (рис. 2). В первичной структуре отделение крупногабаритных предметов и текстильные компоненты проводятся вручную, обеспечивая работу приемного бункера. Далее следует включить вибрационные грохоты для отделения сыпучих и мелких материалов. Затем следует расположить разрыватель пакетов, после чего желательно проводить процесс дробления твердомерзлых компонентов с отсевом мелких фракций. Механическое дробление отходов путем грохочения проводится до различных размерных классов. Сепарация, отделение по фракциям, во многих заводах проводится вручную, что значительно снижает качество и скорость процесса. Использование магнитного и вихретокового сепараторов значительно упростило бы процесс отбора с уменьшением числа работников сортировки. Необходимым агрегатом автоматизированного МПЗ является прессовое оборудование. Таким образом на первом этапе формирования мусоросортировочная станция должна быть оборудована как минимум: транспортирующими конвейерами, вибрационным грохотом, разрывателем пакетов и прессовым оборудованием, которые выпускаются российскими предприятиями. Например, компания ООО «Хусманн Рус» предлагает широкий спектр технологий и решений для сортировки и переработки отходов, включая оборудование для сжигания, компактирования, биогазового преобразования и многое другое.



Рис. 2. Этапы процессов сортировки отходов

Fig. 2. Stages of waste sorting processes

Проведем прогнозное обоснование планов реализации задач по утилизации отходов, представленных в программных документах. С этой целью проводится анализ практик по утилизации отходов. Для формирования и понимания перспективных и предельно достигнутых в современных условиях показателей по утилизации отходов приведены и установлены граничные достигнутые значения. В странах Евросоюза более 40 % ТБО собирается отдельно и перерабатывается [Лыков и др., 2019]. В Германии и Швеции на свалках складывается около 1 % твердых коммунальных отходов. В Великобритании и Швеции ежегодно около 50 % коммунальных отходов отправляется на вторичное использование. Япония направляет 80 % твердых отходов на производство энергии. Применяемые технологии и оборудование зависят от качественного состава ТБО. Для определения их состава воспользуемся и проанализируем данные, представленные в различных источниках. В начале проектирования полигона ТБО в Костроме [Мальцева, 2017] был изучен состав смешанных коммунальных отходов, и получены следующие примерные соотношения: 5 % макулатуры, 20 % вторичных ресурсов, 25–30 % – материалов для энергетического топлива, 30 % органической фракции, теоретически пригодной для компостирования. Изучение морфологического состава ТБО показало [Ламзина и др., 2015], что потенциальное сырье для использования составляет 60–80 %, из которых 25–35 % пригодны для компостирования. Приведем обобщенный состав собираемых ТБО в зависимости от уровней доходов населения [Шилкина, 2020]: древесина – 1–4 %, металл – 1–4 %, резина, кожа – 1–4 %, пластик – 6–13 %, бумага, картон – 7–25 %, органическая фракция – 32–56 %, прочее – 11–24 %.

Установим исходные данные по утилизации ТБО для формирования состава технологического оборудования Якутского мусоросортировочного завода. В качестве экспертных данных примем показатели, предложенные различными авторами и приведенные выше. С учетом практики сортировки отходов, исходя из внедрения метода раздельного сбора на месте образования и сбора при заводской сортировке, возможно выделение около 30 % вторичных ресурсов. При работе мусоросортировочного комплекса будет выполнен 100 % план сортировки и на начальном этапе 30 % отходов может быть отправлено на переработку. Следовательно, оставшаяся часть сортировочного материала может быть уплотнена и отправлена на складирование. Металл составляет 1 % от сортировки (1500 тонн) и отправляется на городские пункты приема. Предположительно, около 30 % выделенных отходов составляют органические компоненты, для г. Якутска объем отходов в год составит около 40 тонн. Такие отходы можно отправлять на свалку или переработку экологически безопасным способом – компостированием. Компостирование – это биологический процесс, в ходе которого уничтожаются патогенные микроорганизмы и превращаются в удобрения. Существуют различные технологии компостирования [Хамадьярова, 2023]. Компостирование будет значительно сокращать объемы захоронения материала, иметь экологический и экономический эффект и является методом, который может быть реализован на практике в зависимости от решимости руководства города.

Наиболее распространенной технологией извлечения энергии из отходов является сжигание [Лыков и др., 2019]. Твердые бытовые отходы на 70–80 % состоят из горючих, биоразлагаемых компонентов, таких как пищевые и растительные остатки, биомасса, древесина, макулатура, картон, пластик и полимеры. Как было обобщено выше, для получения полезной энергии можно использовать максимум 80 % отходов. Основное преимущество сжигания по сравнению с другими вариантами – эффективность утилизации отходов. Технология сжигания достаточно затратная, требуется предварительная подготовка с использованием измельчителя, дробления крупногабаритных изделий. Примерно не менее 30 % отходов города (40 тыс. тонн) можно утилизировать путем сжигания. Приведенные технологии компостирования и сжигания могут быть реализованы после завершения первой очереди строительства Якутского мусороперерабатывающего завода. Заключительным этапом функционального формирования мусороперерабатывающего завода в среднесрочной перспективе станет внедрение автоматизированных роботизированных комплексов.

Автоматизация утилизации отходов г. Якутска

Перспективно важной становится утилизация коммунальных отходов в г. Якутске с применением мусоросортировочных автоматизированных технологий. Инновационные технологии разрыхления и дозирования, сепарации позволяют значительно повысить эффективность сортировки, улучшая качество вторичных материалов и снижая затраты на переработку. Организация высокоэффективного производства возможна только при внедрении современной технологии производства с применением автоматизированного высокотехнологичного оборудования. При создании автоматизированного сортировочного комплекса предлагается использовать технологическое оборудование, анализ которого выполнен выше: платформу предварительной сортировки, робот-манипулятор, шредер, разрыватель пакетов, барабанные грохоты, оптический сканер, баллистический сепаратор, кабину ручной сортировки, пресс. Проведен анализ отечественных и зарубежных аналогов с точки зрения их функционального и технологического решения. Сравнение выполнено для МПЗ различных фирм EcoSpectrum, Хусманн Рус, 7GreenLine по производительности, энергопотреблению, стоимости. Проект, разработанный под руководством автора, предусматривает создание автоматизированного сортировочного комплекса, состоящего из двух линий, который представлен в работе Бытырова [2024].

Заключение

В заключении следует отметить, что власти Якутска начали обращать внимание на проблемы с утилизацией коммунальных отходов, решение которых возможно с внедрением предложенной на основе анализа исследований комплексной системы обращения с отходами, рассчитанной на дальнюю перспективу. Важным этапом комплексной системы обращения с ТКО является селективный сбор отходов. Формирование социально-экологической культуры при внедрении системы раздельного сбора отходов по месту образования – процесс долгосрочный. Для развития предпринимательской деятельности в сфере переработки вторичного сырья в Якутске должны быть созданы условия гарантированного сбыта продукции из вторичного сырья, принятие компенсационных мер за использование отходов с низким содержанием полезных компонентов. Для разработки эффективной и экологически безопасной системы утилизации отходов в городе в современных эколого-экономических реалиях будет востребовано соответствующее высокотехнологичное оборудование, которое должно внедряться поэтапно. Проведен анализ технологий и технологического оборудования и их возможность использования в условиях Якутска. Предложены варианты технологического оборудования по этапам постепенного развития автоматизированной сортировки отходов. В будущем процессы утилизации отходов должны быть полностью автоматизированы.

Список литературы

- Бытыров А.П. 2024. Разработка технологической схемы мусоросортировочного комплекса г. Якутск. В кн.: Аммосов-2024. Материалы общеуниверситетской научной конференции студентов и магистрантов, Якутск, 5 апреля 2024. Якутск, Издательский дом СВФУ: 876–879.
- Губанов Л.Н., Красильникова А.Н. 2013. Комплексная технология по переработке и утилизации твердых бытовых отходов. Приволжский научный журнал, 4(28): 149–152.
- Иванова О.Е., Горбина Н.Н. 2020. Твердые коммунальные отходы: вопросы сбора и утилизации. Отходы и ресурсы, 7(1): 3. <https://doi.org/10.15862/03ECOR120>
- Коркин А.Н., Алькова Е.Л., Пестерев А.П. 2020. Проведение анализа в условиях Крайнего Севера методов, средств снижения утилизации отходов и производства на примере г. Якутск. Научный электронный журнал Меридиан, 19(53): 297–299.
- Левакова И.В., Арустамов Э.А. 2021. Проблемы реализации программы комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами. Отходы и ресурсы, 8(1): 3. <https://doi.org/10.15862/03ECOR121>
- Ламзина И.В., Желтобрюхов В.Ф., Шайхиев И.Г. 2015. Анализ методов сортировки твердых бытовых отходов. Вестник технологического университета, 18(5): 244–247.
- Лисанги К.А. 2020. Проблемы утилизации отходов в республике Саха (Якутия) (на примере предприятия ИП Петров Е.Н.). В кн.: Студенческий научный форум – 2020. Материалы XII Международной студенческой научной конференции, Москва, 01 декабря 2019 – 06 марта 2020. Саратов, Евроазиатская научно-промышленная палата: 1–5.
- Лыков И.Н., Логинов А.А., Стрельцов А.Б., Голофтьева А.С. 2019. Эколого-экономическая оценка использования энергетического ресурса твердых коммунальных отходов в инновационных технологиях. Modern Science, 9–2: 28–32.
- Мальцева О.Н. 2017. Автоматическая сортировка отходов: опыт Костромы. Твердые бытовые отходы, 10(136): 24–29.
- Мищенко О.А. 2023. Модернизация сортировочного комплекса на мусороперегрузочной станции «Северная» в городе Хабаровске. Отходы и ресурсы, 10(3): 11ECOR323. <https://doi.org/10.15862/11ECOR323>
- Хамадьярова А.К. 2023. Различные методы компостирования: экологичные способы утилизации органических отходов. В кн.: Технологии переработки отходов с получением новой продукции. Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, Киров, 14–15 ноября 2023. Киров, Вятский государственный университет: 137–141.
- Шилкина С.В. 2020. Мировые тенденции управления отходами и анализ ситуации в России. Отходы и ресурсы, 7(1): 5. <https://doi.org/10.15862/05ECOR120>
- Шубов Л.Я. 2012. Схемы механической сортировки отходов (анализ технологий). Твердые бытовые отходы, 3(69): 14–25.
- Цховребов Э.С. 2024. Развитие системы экологически безопасного обращения с отходами с учетом социально-экономических факторов. Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского, 1(91): 44–62. <https://doi.org/10.17277/voprosy.2024.01.pp.044-062>
- Bárkányi Á., Egedy A., Sarkady A., Kurdi R., Abonyi J. 2022. Expert-Based Modular for Municipal Waste Processing Technology Desing. Sustainability, 14(24): 16403. <https://doi.org/10.3390/su142416403>
- Cheng T., Kobayashi H., Ko K., Cheng T., Onoda H. 2022. Study on Introduction of Ai and Robotics to Improve the Efficiency of Construction Mixed Waste Disposal. The Proceedings of the Symposium on Environmental Engineering, 32: 2205-08-02. DOI: 10.1299/jsmeenv.2022.32.2205-08-02
- Mukherjee G.A., Wanjari R.U., Chakraborty R., Renu K., Vellingiri B., George A., Rajan C.R.S., Gopalakrishnan A.V. 2021. Are View on Modern and Smart Tech-Nologies for Efficient Waste Disposal and Management. Journal of Environmental Management, 297: 113347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113347>
- Ofori-Agyei G.O., Baah O.P.K., Adom D., Amankwa J.O., Abedi A. 2023. Upcycling of Solid Waste for Furniture Production: an Environmentally Sustainable Solution for Waste Disposal. Journal of Innovations and Sustainability, 7(4): 04. <https://doi.org/10.51599/is.2023.07.04.04>

- Oluwafemi J., Olukanni D., Justin L.D. 2021. Improper Waste Disposal in Ota, Ogun State-A Proposed Waste Segregation Approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 1734(1): 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1734/1/012038>
- Yuan Ya. 2022. Path Selection for High-Quality Development of Waste Disposal Industry Under Waste Charging System *Frontiers in Business. Economics and Management*, 4(2): 55–60. <https://doi.org/10.54097/fbem.v4i2.790>

References

- Bytyrov A.P. 2024. Development of the Technological Scheme of the Yakutsk Waste Sorting Complex. In: Ammosov-2024. Materials of the university-wide scientific conference of students and undergraduates, Yakutsk, 5 April 2024. Yakutsk, Publ. NEFU: 876–879 (in Russian).
- Gubanov L.N., Krasilnikova A.N. 2013. Complex Technology on Processing and Recycling Municipal Solid Waste. *Privolzhsky Scientific Journal*, 4(28): 149–152 (in Russian).
- Ivanova O.E., Gorbina N.N. 2020. Solid Municipal Waste: Collection and Disposal Issues. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 7(1): 3 (in Russian). <https://doi.org/10.15862/03ECOR120>.
- Korkin A.N., Alcova E.L., Pesterev A.P. 2020. Provedeniye analiza v usloviyakh Kraynego Severa metodov, sredstv snizheniya utilizatsii otkhodov i proizvodstva na primere g. Yakutsk [Conducting an Analysis in the Conditions of the Extreme North of Methods, Means of Reducing Waste Disposal and Production Using the Example of Yakutsk]. *Scientific electronic journal Meridian*, 19(53): 297–299.
- Levakova I.V., Arustamov E.A. 2021. Problems of Implementation of the Program of the Integrated System of Solid Municipal Waste Management. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*, 8(1): 3 (in Russian). <https://doi.org/10.15862/03ECOR121>.
- Lamzina I.V., Zheltobryukhov V.F., Shaikhiev I.G. 2015. Analiz metodov sortirovki tverdykh bytovykh otkhodov [Analysis of solid household waste sorting methods]. *Bulletin of the Technological University*, 18(5): 244–247.
- Lisangi K.A. 2020. Problemy utilizatsii otkhodov v respublike Sakha (Yakutiya) (na primere predpriyatiya IP Petrov E.N.) [Problems of Waste Disposal in the Republic of Sakha (Yakutia) (on the Example of the Enterprise IP Petrov E.N.)]. In: *Studencheskiy nauchnyy forum – 2020* [Student Scientific Forum – 2020]. Proceedings of the XII International Student Scientific Conference, Moscow, 01 December 2019 – 06 March 2020. Saratov, Publ. Eurasian Scientific and Industrial Chamber: 1–5
- Lykov I.N., Loginov A.A., Streltsov A.B., Golofteeva A.S. 2019. Ekologo-ekonomicheskaya otsenka ispolzovaniya energeticheskogo resursa tverdykh kommunalnykh otkhodov v innovatsionnykh tekhnologiyakh [Ecological and Economic Assessment of the Use of the Energy Resource of Solid Municipal Waste in Innovative Technologies]. *Modern Science*, 9–2: 28–32.
- Maltseva O.N. 2017. Avtomaticheskaya sortirovka otkhodov: opyt Kostromy [Automatic Waste Sorting: Kostroma's Experience]. *Tverdye bytovyye otkhody*, 10(136): 24–29.
- Mishchenko O.A. 2023. Modernization of the sorting complex at the waste transfer station «Severnaya» in the city of Khabarovsk. *Russian journal of resources, conservation and recycling*, 10(3): 11ECOR323 (in Russian). <https://doi.org/10.15862/11ECOR323>.
- Khamadyarova A.K. 2023. Razlichnyye metody kompostirovaniya: ekologichnyye sposoby utilizatsii organicheskikh otkhodov [Various Composting Methods: Eco-Friendly Ways to Dispose of Organic Waste]. In: *Tekhnologii pererabotki otkhodov s polucheniyem novoy produktsii* [Waste Recycling Technologies with the Production of New Products]. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference, Kirov, 14–15 November 2023. Kirov, Publ. Vyatka State University: 137–141.
- Shilkina S.V. 2020. Global Trends in Waste Management and Analysis of the Situation in Russia. *Russian journal of resources, conservation and recycling*, 7(1): 5 (in Russian). <https://doi.org/10.15862/05ECOR120>.
- Shubov L.Ya. 2012. Skhemy mekhanicheskoy sortirovki otkhodov (analiz tekhnologiy) [Schemes of Mechanical Waste Sorting (Analysis of Technologies)]. *Tverdye bytovyye otkhody*, 3(69): 14–25.



- Tshovrebov E.S. 2024. The Development of an Environmentally Safe Waste Management System Regarding Socio-Economic Factors. Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University, 1(91): 44–62 (in Russian). <https://doi.org/10.17277/voprosy.2024.01.pp.044-062>
- Bárkányi Á., Egedy A., Sarkady A., Kurdi R., Abonyi J. 2022. Expert-Based Modular for Municipal Waste Processing Technology Desing. Sustainability, 14(24): 16403. <https://doi.org/10.3390/su142416403>
- Cheng T., Kobayashi H., Ko K., Cheng T., Onoda H. 2022. Study on Introduction of Ai and Robotics to Improve the Efficiency of Construction Mixed Waste Disposal. The Proceedings of the Symposium on Environmental Engineering, 32: 2205-08-02. DOI: 10.1299/jsmeenv.2022.32.2205-08-02
- Mukherjee G.A., Wanjari R.U., Chakraborty R., Renu K., Vellingiri B., George A., Rajan C.R.S., Gopalakrishnan A.V. 2021. Are View on Modern and Smart Tech-Nologies for Efficient Waste Disposal and Management. Journal of Environmental Management, 297: 113347. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113347>
- Ofori-Agyei G.O., Baah O.P.K., Adom D., Amankwa J.O., Abedi A. 2023. Upcycling of Solid Waste for Furniture Production: an Environmentally Sustainable Solution for Waste Disposal. Journal of Innovations and Sustainability, 7(4): 04. <https://doi.org/10.51599/is.2023.07.04.04>
- Oluwafemi J., Olukanni D., Justin L.D. 2021. Improper Waste Disposal in Ota, Ogun State-A Proposed Waste Segregation Approach. Journal of Physics: Conference Series, 1734(1): 012038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1734/1/012038>
- Yuan Ya. 2022. Path Selection for High-Quality Development of Waste Disposal Industry Under Waste Charging System Frontiers in Business. Economics and Management, 4(2): 55–60. <https://doi.org/10.54097/fbem.v4i2.790>

*Поступила в редакцию 03.02.2025;
поступила после рецензирования 10.03.2025;
принята к публикации 17.04.2025*

*Received February 03, 2025;
Revised March 10, 2025;
Accepted April 17, 2025*

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Прохоров Валерий Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, действительный член МАНЭБ, профессор кафедры прикладной механики и строительного материаловедения Инженерно-технического института, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valery A. Prokhorov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Full member of MANEB, Professor at the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science, the Institute of Engineering and Technology, Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia