

УДК 628.4

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОРТИРОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТОВ МЕТОДОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Кузьминых Е.В., студентка гр. УКмт-241, 2 курс, Ушаков А.Г., к.т.н., доцент
Научный руководитель: Ушакова Е.С., к.т.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Актуальность проблемы обращения с полимерными отходами в современном мире приобретает критический характер. Ежегодно в водные экосистемы попадает от 19 до 23 млн тонн пластика, что усугубляется его высокой стойкостью к разложению и способностью оказывать токсическое воздействие на здоровье человека и состояние окружающей среды [1]. Сложившаяся ситуация требует не просто наращивания объемов переработки, но и качественного изменения самих подходов к организации этих процессов.

Процесс переработки пластика обычно начинается со сбора и сортировки отходов. На этом этапе пластик разделяют по типу (маркировке), цвету и степени загрязнения, поскольку разные виды пластика требуют разных методов переработки и не могут быть смешаны [2]. После сортировки следует измельчение: с помощью дробилок или шредеров пластик превращают в мелкие хлопья, которые называют флексом, которые тщательно отмывают и сушат, чтобы удалить грязь, остатки пищи, клей от этикеток и другие примеси. Далее очищенный флекс подвергается термической обработке – в экструдере пластик нагревается до температуры плавления и превращается в однородную вязкую массу. Расплавленный материал проходит через фильтры для дополнительной очистки, затем выдавливается через специальные отверстия, формируя тонкие нити. После охлаждения эти нити разрезаются на гранулы одинакового размера. Полученные вторичные гранулы являются готовым сырьем, которое производители используют для создания новых пластиковых изделий [3].

Традиционные методы сортировки и утилизации зачастую характеризуются низкой эффективностью, высокими издержками и значительными потерями ресурсов, что делает их экономически малопривлекательными. В этой связи особую значимость приобретает поиск управленческих и производственных решений, способных трансформировать сферу рециклинга. Одним из наиболее перспективных направлений является применение инструментов бережливого производства.

Бережливое производство представляет собой управленческую философию, нацеленную на создание ценности для клиента путем системного устранения любых видов потерь. Целью данной статьи является разработка и

обоснование комплекса мероприятий по оптимизации процесса сортировки и переработки полимерных отходов на основе применения инструментов бережливого производства для повышения экономической эффективности и качества вторичного сырья [2, 3].

Центральным понятием философии бережливого производства является устранение потерь, или «муда», – любых действий, потребляющих ресурсы, но не создающих ценности для конечного потребителя. Применительно к процессам сортировки и переработки полимерных отходов классификация потерь приобретает специфическое наполнение. Перепроизводство выражается в выпуске большего объема вторсырья, чем требуется следующему процессу или рынку. Ожидание является критическим видом потерь, проявляющимся в простоях дробилок, экструдеров или сортировочных линий из-за несогласованности поставок сырья или ожидания ремонта. Лишняя транспортировка представляет собой ненужное перемещение полимерных отходов между участками. Избыточные запасы, такие как переполненные площадки вторсырья, увеличивают риски возгорания и ухудшают качество пластика. Ненужные движения персонала включают поиск инструмента или неудобное расположение контейнеров. Избыточная обработка возникает при выполнении действий, не требуемых потребителем вторичного сырья. Наиболее затратный вид потерь – брак, включающий несоответствие вторичной гранулы требованиям по чистоте или влажности. Наконец, неиспользованный человеческий потенциал проявляется в отсутствии системы сбора предложений от операторов линий и сортировщиков [4].

В переработке фактор времени играет ключевую роль из-за ограниченных мощностей складов и риска деградации свойств пластика. Инструменты бережливого производства позволяют сократить время прохождения сырья от приемки до отгрузки готовой продукции, ускоряя оборачиваемость средств [3]. Система подачи предложений и проведения кайдзен-мероприятий вовлекает работников в улучшение процессов, а в сфере переработки, где качество сортировки напрямую зависит от внимательности персонала, инициативность сотрудников становится ключевым драйвером повышения производительности [4, 5]. Кроме того, применение методов быстрой переналадки позволяет быстрее адаптироваться к изменению объемов и состава поступающего сырья, а также к колебаниям рыночного спроса на различные фракции вторичных полимеров.

Ключевым инструментом диагностики и оптимизации является картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping, VSM). Построение карты текущего состояния начинается с приемки сырья, где происходят потери из-за длительного ожидания разгрузки и нехватки места. Далее следует этап сортировки, выполняемый вручную или автоматически, где потери связаны с низкой производительностью и ошибками идентификации пластика. Для кардинального снижения этих потерь применяются системы технического зрения и роботизированной сортировки. Современные оптические сепараторы, оснащенные высокоскоростными камерами и гиперспектральными

сенсорами, способны определять тип полимера по спектральному отпечатку, цвет и степень загрязнения с точностью до 98-99%. Нейросетевые алгоритмы, предварительно обученные на выборках из десятков тысяч изображений, обрабатывают каждый объект за 50-200 миллисекунд и передают сигнал пневматическим соплам или роботизированным манипуляторам для отклонения объекта в соответствующий бункер. Такая автоматизация позволяет увеличить производительность сортировки с 0,5-1 тонны в час на одного оператора до 3-8 тонн в час на одну автоматическую линию [6].

После сортировки сырье поступает на дробление, где потери возникают из-за частого обслуживания ножей. Критическим узким местом часто является моечный комплекс: мойка для удаления клея и этикеток требует высокого расхода воды и энергии, ограничивая производительность всей линии [3].

Оптимизация мойки достигается внедрением интенсивных моечных машин и замкнутого цикла водоснабжения, что сокращает время цикла и расход воды.

Затем следует экструзия и грануляция с потерями времени на остановки для смены фильтров. Для исключения простоев экструдера рекомендуется установка системы автоматической смены фильтров, обеспечивающая непрерывность процесса [2]. Завершает цикл упаковка и складирование готовой продукции, где возникают потери от затоваривания и лишних перемещений.

Анализ карты текущего состояния позволяет выявить ключевые узкие места. Ручной труд на сортировке снижает скорость и зависит от качества входного сырья. Моечный комплекс с высокими затратами времени на очистку ограничивает производительность. Экструдер требует частой смены фильтрующих сеток из-за недостаточной очистки на предыдущих этапах. Наблюдается высокое время пролеживания сырья между дроблением и мойкой, что увеличивает общее время цикла.

Для выравнивания потока предлагается внедрение системы «канбан», успешно применяемой в современных производствах [7], при которой дробление работает только по потребности мойки, а мойка – по потребности экструдера.

Важнейшую роль в повышении эффективности играет организация рабочего пространства на основе системы 5S. Первый шаг – сортировка (Seiri): с рабочих мест удаляются все ненужные предметы, инструменты и материалы, которые не используются в текущем цикле. Второй шаг – соблюдение порядка (Seiton): каждому инструменту и материалу закрепляется строго определенное место с визуальной маркировкой. Например, для ножей дробилки организуется стенд с контурами инструмента, а для сменных фильтров экструдера выделяется стеллаж с бирками, указывающими тип и дату изготовления. Третий шаг – содержание в чистоте (Seiso): операторы проводят ежедневную уборку рабочих зон и оборудования, что позволяет своевременно выявлять утечки масла, ослабление креплений или накопление загрязнений. Четвертый шаг – стандартизация (Seiketsu): разрабатываются регламенты выполнения первых трех шагов, чек-листы уборки и планы-графики аудитов.

Пятый шаг – совершенствование (Shitsuke): поддержание дисциплины и постоянное улучшение стандартов через регулярные аудиты с участием руководителей [5]. Разделение отходов на перерабатываемые и неперерабатываемые непосредственно на входе исключает их загрязнение. Оператор должен сразу отделять ценные фракции от мусора. Стандартизация контейнеров с использованием четкой маркировки и цветового кодирования сокращает время поиска нужной тары. Например, синий цвет может использоваться для ПЭТ, желтый для ПНД, зеленый для ПП.

Разработка стандартных операционных карт для сортировщиков базируется на быстрой идентификации маркировки пластика по треугольнику с цифрой [2]. Сортировщик должен руководствоваться четким алгоритмом: ценные фракции направляются в соответствующие цветные контейнеры, а сложные или опасные фракции – в отдельные емкости. Такая стандартизация минимизирует ошибки и ускоряет работу. Для предотвращения случайного попадания неперерабатываемых материалов в ценные фракции применяется принцип защиты от непреднамеренных ошибок (Рока-Йоке). На сортировочной линии могут быть установлены направляющие с шаблонами, физически не позволяющие бросить бутылку не того типа в неправильный контейнер. Например, если контейнер для ПЭТ-бутылок оснащен отверстием, соответствующим диаметру стандартной бутылки, то бутылка другого формата физически не может быть туда помещена. Используются визуальные подсказки с изображениями разрешенных и запрещенных типов пластика непосредственно в зоне загрузки каждого контейнера. На экструзионной линии Рока-Йоке может быть реализован в виде датчика контроля влажности гранул, который при превышении порогового значения автоматически направляет материал в бункер брака, не допуская его смешивания с качественной продукцией [8].

При обнаружении отклонений оператор имеет право остановить линию с помощью системы андон (Andon), чтобы предотвратить массовый брак. Техническая реализация системы андон включает несколько уровней. На каждом критическом участке – сортировочном, моечном, экструзионном – устанавливаются световые табло с цветовой индикацией: зеленый – нормальный режим, желтый – требуется внимание (например, уровень загрузки бункера достиг критической отметки), красный – аварийная остановка. Вдоль линии через каждые 5-10 метров размещаются кнопки и тросовые выключатели для ручной остановки. При нажатии кнопки сигнал поступает на программируемый логический контроллер, который выполняет алгоритм безопасной остановки: отключает приводы конвейеров, перекрывает подачу сырья и переводит световое табло в красный режим с указанием кода остановки (например, «А1» – засорение ножей дробилки, «В3» – превышение влажности после сушки). Одновременно сигнал дублируется на центральный пульт управления и через промышленную сеть передается на планшеты мастеров участка и ремонтной службы. В современных условиях информацию об остановке автоматически можно регистрировать в MES-системе (Manufacturing

Execution System) с фиксацией времени, причины и последующего времени восстановления. Это позволяет анализировать частоту и продолжительность простоев для последующих кайдзен-мероприятий. Принцип работы системы предполагает, что оператор не покидает пост после остановки, а ожидает прибытия мастера или ремонтника. Вместе они по чек-листу выявляют причину, устраняют ее и запускают линию, после чего проводят краткий разбор инцидента с заполнением листа регистрации остановок [8].

Для сокращения простоев оборудования при переходе с одного типа сырья на другой применяется метод быстрой переналадки (SMED). Переналадка оборудования при переходе с переработки пленки на переработку жестких изделий требует очистки и настройки узлов дробления, мойки и экструзии. Метод SMED предполагает разделение операций на внутренние, выполняемые при остановленном оборудовании, и внешние, которые можно провести во время работы линии. Например, при переналадке экструдера внутренней операцией является демонтаж шнека и замена фильтрующих сеток, а внешней – подогрев новой фильтрующей головки до рабочей температуры и подготовка сменного инструмента. Для реализации подхода создаются стандартизированные тележки для переналадки, на которых в строго определенном порядке разложены все необходимые инструменты, крепеж и оснастка для каждого типа продукта. Предварительная подготовка сменных фильтров, ножей и калибровочных приспособлений до остановки линии позволяет сократить переналадку с нескольких часов до 30-40 минут. Фиксация времени переналадки в специальном журнале и последующий анализ операций позволяют выявлять дальнейшие возможности для перевода внутренних операций во внешние [8].

Поддержание оборудования в работоспособном состоянии без поломок обеспечивается системой всеобщего ухода за оборудованием (TPM). В отличие от традиционного подхода, когда ремонтом занимаются только специальные службы, TPM вовлекает в процесс ухода операторов линий. Операторы проходят обучение по базовым операциям технического обслуживания: ежедневные чистки, осмотры на наличие утечек, проверка уровня смазки, контроль вибрации и температуры подшипников. Для каждого типа оборудования разрабатываются чек-листы ежедневного обслуживания, где оператор отмечает состояние наиболее критичных узлов. Особое внимание уделяется наиболее уязвимым узлам: ножам дробилок, которые тупятся и требуют замены, а также фильтрам экструдеров, засорение которых приводит к росту давления и остановке. В TPM используется система визуального контроля: на корпусах оборудования наносятся метки уровня масла, стрелки направления вращения, цветовые индикаторы допустимых температур. Это позволяет оператору при обходе за секунды оценить состояние агрегата. Периодически проводятся аудиты TPM, где оценивается не только состояние оборудования, но и качество выполнения операторами процедур ежедневного обслуживания. Регулярное обслуживание по системе TPM снижает количество внезапных простоев и дефектов, связанных с нестабильной работой оборудования [4].

Важнейшим элементом непрерывного совершенствования является система кайдзен – вовлечение всех сотрудников в процесс улучшений, эффективность которой подтверждена производственными внедрениями [4] и масштабными программами обучения персонала [5]. На перерабатывающем предприятии организуются рабочие группы из операторов, технологов и ремонтников для решения конкретных проблем. Процесс кайдзен-мероприятия структурирован: группа собирается на 30-60 минут, четко формулирует проблему (например, «частое забитие ножей дробилки посторонними предметами»), использует метод «5 почему» для выявления коренной причины (почему забивается? – потому что попадают камни. Почему попадают камни? – потому что не отсеиваются на входе), разрабатывает и внедряет контрмеру (установка магнитного сепаратора и вибросита на входе). Результат фиксируется в стандартной операционной карте, а затем тиражируется на другие линии. Лучшие предложения сотрудников (например, приспособление для быстрой очистки ножей дробилки или изменение компоновки оборудования для сокращения перемещений) рассматриваются на кайдзен-досках, и авторы поощряются. Такой подход позволяет использовать неиспользованный ранее потенциал персонала и постоянно повышать эффективность производства [4].

Применение описанных инструментов бережливого производства в интеграции с современными технологиями механизации позволяет трансформировать переработку полимеров из затратного и экологически обременительного процесса в высокоэффективное производство. Lean-подход, усиленный системами машинного зрения, автоматической сортировки, а также инструментами 5S, Poka-Yoke, Andon, SMED, TPM и кайдзен, помогает сделать процессы чище и рентабельнее, устраняя все, что не добавляет ценности конечному продукту. Комплексное внедрение рассмотренных методов способствует достижению главной цели: повышению экономической эффективности переработки и качества вторичного полимерного сырья, что вносит вклад в развитие экономики замкнутого цикла и снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду [1, 3].

Список литературы:

1. СИБУР займется химической переработкой пластиковых отходов / Татнефтехиминвест-холдинг. – 2022. – URL: <https://tnhi.ru/news/3608/> (дата обращения: 19.03.2026).
2. Patel, A. Life Cycle Assessment of Fused Filament Fabrication Using Recycled Plastic and Carbon Fiber Composites / A. Patel, S. Kumar, R. Singh, T. Gupta // *Polymers*. – 2026. – Vol. 18, No. 5. – P. 660.
3. Nellström, M. Life cycle assessment of closed loops for industrial plastic packaging / M. Nellström, J. Nordin, C. Lindfors // *CORE*. – 2022–2024. – URL: <https://core.ac.uk/display/> (дата обращения: 19.03.2026).
4. Quiroz-Flores, J. C. Lean Kaizen model to reduce waste in the mixing process based on engineering methods in a precast concrete company / J. C. Quiroz-Flores, H. Araujo-Chuquiruna, A. A. Villa-Carrasco // *Proceedings of the 2nd*

LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2022). – Virtual Edition, 2022. – P. 1–8.

5. Bosch Builds Sustainable RFID Deployment / Tageos. – 2026. – URL: <https://www.tageos.com/en/news/bosch-builds-sustainable-rfid-deployment.html> (дата обращения: 19.03.2026).

6. Zimbabwe Wraps Up Japan-Supported Kaizen Programme / HealthTimes. – 2026. – URL: <https://healthtimes.co.zw/2026/03/16/zimbabwe-wraps-up-japan-supported-kaizen-programme/> (дата обращения: 19.03.2026).

7. TOMRA Recycling. Sensor-Based Sorting Solutions for Plastics Recycling / TOMRA Systems ASA. – 2024. – URL: <https://www.tomra.com/recycling> (дата обращения: 19.03.2026).

8. Liker, J. K. The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer / J. K. Liker. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill, 2021. – 448 p.