

Д.Л. Борисов, Т.Г. Филькин, В.Н. Коротаев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ТЕХНОЛОГИИ ОПТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ ОТХОДОВ: АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДУШНОЙ СЕПАРАЦИИ

Поток твердых бытовых отходов, подвергаемый сортировке, всегда является чрезвычайно гетерогенным по составу, его компоненты обладают разными физико-механическими и аэродинамическими свойствами. При сортировке такого потока оборудованием, использующим оптическую технологию распознавания материала и воздушную сепарацию, эти свойства оказывают огромное влияние на технологические параметры работы, что определяет конечное качество процесса сортировки.

В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность воздушной сепарации различных компонентов ТБО при работе на оборудовании оптико-механической сортировки.

Ключевые слова: ТБО, оптико-механическая сортировка, воздушная сепарация, ручная сортировка.

D.L. Borisov, T.G. Filkin, V.N. Korotaev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

SENSOR-BASED SORTING TECHNOLOGIES OF WASTE: ANALYSIS OF FACTORS AFFECTS THE AIR SEPARATION EFFICIENCY

Municipal solid waste (MSW) flow is sorted, has always extremely heterogeneous composition, its components have different physical, mechanical and aerodynamic properties. When we sort MSW by the equipment of material optical recognition technology and air separation, these properties have a huge impact on the equipment technological parameters. It determines the final quality of the sorting process.

The main factors affect the air separation efficiency of MSW sorting by sensor-based technology are present.

Keywords: MSW, sensor-based sorting, air separation, manual sorting.

1. Введение

Одним из наиболее перспективных направлений обращения с твердыми бытовыми отходами (ТБО) является максимальное использование их ресурсного потенциала посредством извлечения фракций вторичного сырья. В рамках этого направления разработаны различные технологии сортировки ТБО.

Различают ручную и автоматическую сортировку. При ручной сортировке распознавание нужных материалов производится персоналом визуально, а отбор осуществляется вручную (при этом отдельные вспомогательные операции могут быть механизированы). На линиях автоматической сортировки идентификация отбираемых материалов и их выделение из общего потока происходит без участия персонала. При этом в основе технологий автоматической сортировки обычно лежит использование сенсоров оптического распознавания материалов – так называемая оптическая сортировка (*optical sorting, sensor-based sorting*) [1].

Важным направлением повышения эффективности автоматической сортировки отходов является увеличение эффективности отделения (сепарации) выбранных компонентов. В настоящее время в системах оптической сортировки материалов используется три способа отделения ресурсных фракций:

- отделение посредством воздушной струи, выбрасываемой из воздушного сопла (*air nozzle, air jet*) – так называемая «воздушная» сепарация;
- отделение посредством системы откидных заслонок (*flap system*);
- отделение посредством механического манипулятора по типу грейферного захвата (*mechanical fingers*).

В настоящее время в системах автоматической сортировки отходов наибольшее распространение получила воздушная сепарация. В данном материале анализируются факторы, оказывающие влияние на эффективность выделения компонентов из потока отходов при воздушной сепарации. Только на основании такого анализа может быть достигнуто повышение эффективности отделения компонентов, что позволит увеличить долю отходов, перерабатываемых с помощью систем автоматической сортировки.

2. Предмет и задачи исследования

Принцип работы оборудования автоматической сортировки с системой воздушной сепарации показан на рис. 1.

Поступающий для сортировки материал (рис. 1, поз. 1) равномерно подается по транспортеру к области работы сенсоров (рис. 1, поз. 2). Технология основывается на облучении поверхности отходов светом с определенной длиной волны и последующем анализе отраженного излучения. Сравнивая спектр отраженного от поверхности

отхода сигнала с уже имеющимся спектром в базе данных системы, машина производит распознавание материала. В конце транспортера находится пневмомодуль, снабженный рядом пневмодюз, или пневмоклапанов (*valve block*).

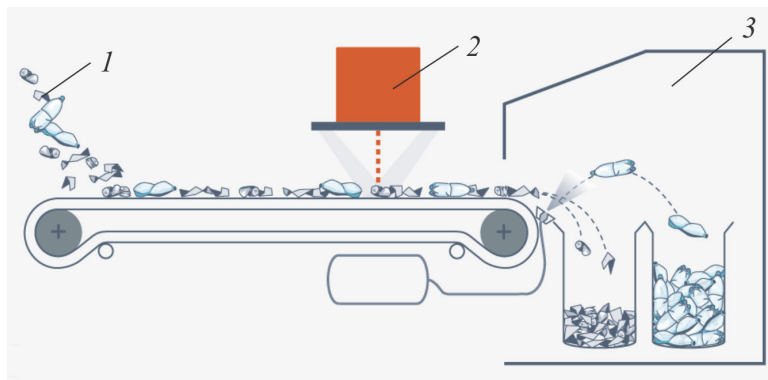


Рис. 1. Принцип работы автоматической системы сортировки отходов [4]

Сортировка происходит в соответствии с активированной программой (заданием). После распознавания нужного для сортировки компонента на блок пневмоклапанов подается управляющий сигнал, через расчетное время – в момент прохождения элемента ТБО над соответствующим клапаном – он открывается, поток воздуха «отстреливает» элемент, таким образом выделяя его из общего потока отходов. Дюзы остаются открытыми на протяжении всего периода времени, когда объект проходит над блоком пневмоклапанов. Таким образом, оборудование способно выделять до 90–95 % заданного компонента. «Неотстрелянные» элементы идут дальше по технологической цепочке. Таким образом, поток материалов можно разделить на две (в случае одного пневмомодуля) фракции [2]. Во избежание неконтролируемого разлета «отстреливаемых» фракций, воздушная сепарация обычно осуществляется в закрытой камере (*separation chamber*; рис. 1, поз. 3). Чтобы исключить неконтролируемые рикошеты отстреливаемых элементов от стенок камеры, одна или несколько ее стенок оборудуются специальными приспособлениями, гасящими энергию удара; таким образом, траектория полета «отстреливаемых» компонентов может реализовываться не полностью.

Список компонентов, слагающих ТБО, довольно велик [3]. Компонентами, представляющими наибольшую ресурсную ценность, являются макулатура (бумага, картон), полимерные пленки, полиэтиленовые и ПЭТ-бутылки, прочие отходы полимеров, дерево и текстиль (как компоненты для получения вторичного топлива), металлы. Соответственно, наиболее тривиальными задачами автоматической сортировки отходов являются выделение и сортировка различных отходов полимеров, разделение бумажных смесей, выделение компонентов для производства вторичного топлива и т.п.

Изучение факторов, влияющих на эффективность воздушной сепарации отходов, целесообразно проводить в отношении вышеперечисленных ключевых компонентов отходов («ключевой» в данном случае означает «широко представленный» и «имеющий сравнительно высокую ресурсную ценность»).

Серия подобных исследований была проведена на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) в 2014 г.; анализировалась эффективность воздушной сепарации («отстрела») следующих компонентов ТБО:

- полиэтиленовых и ПЭТ-бутылок,
- гофрокартона,
- дерева,
- полиэтиленовых пленок (пакетов),
- подгузников (этот вид отходов не образует ресурсно ценной фракции, однако составляет заметную долю в ТБО и является хорошим модельным объектом для изучения процессов воздушной сепарации).

Выбранные компоненты сильно отличаются друг от друга своими свойствами, влияющими на аэродинамику полета (габариты, плотность и т.п.), что позволило довольно полно описать факторы, влияющие на эффективность воздушной сепарации отходов средствами автоматической сортировочной станции. Их качественный анализ составил одну из задач исследования.

3. Результаты и их обсуждение

На конечный результат процесса сортировки отходов – будет ли выбранный компонент отделен или нет – помимо самого процесса «отстрела» (сепарации) большое влияние оказывает *качество распознавания компонента*, под которым понимается то, какие именно участки поверхности компонента (отделяемого предмета) будут распознаны

сканером, какую долю эти участки будут составлять от всей площади поверхности предмета и, соответственно, насколько полным будет воздействие сжатого воздуха на предмет во время его прохождения над блоком пневмодюз. Таким образом, качество распознавания материала определяет точку приложения силы, под действием которой происходит распознавание компонента.

Если установка распознает только часть предмета, то управляющий сигнал будет подан не на все те дюзы, над которыми будет проходить предмет в момент «схода» с конвейера. Соответственно, вектор приложения силы сжатого воздуха будет проходить на некотором удалении от центра масс элемента, и величина воздействия сжатого воздуха будет меньшей, что может привести к тому, что элемент не получит необходимой кинетической энергии поступательного движения по нужной для удаления траектории.

Качество распознавания компонентов определяется множеством факторов, начиная от используемой технологии (лазерная, инфракрасная, рентгеновская или иная спектроскопия) и заканчивая особенностями поверхности идентифицируемых предметов. Не вдаваясь в подробности всех этих факторов, отметим, что, например, в случае с полиэтиленовыми и ПЭТ-бутылками одним из самых тривиальных факторов, снижающих качество распознавания, является наличие этикеток (которые, как правило, не распознаются). В результате распознаются только открытые участки бутылок, вектор приложения силы сжатого воздуха воздействует не на центр масс, а на крайние участки, энергия поступательного движения «отстреливаемой» бутылки сокращается. Кроме того, предмет получает импульс вращательного движения, что делает траекторию его полета менее предсказуемой и также снижает вероятность выделения («отстрела») элемента из потока. Менее распространенным фактором, снижающим качество распознавания полиэтиленовых и ПЭТ-бутылок, является наличие на бутылках всевозможных насадок (например, дозаторов, распылителей и т.п.), изготовленных из других материалов и поэтому не распознающихся, которые также «смещают» ось воздействия сжатого воздуха от центра масс предмета.

Далее рассмотрим факторы, напрямую связанные с самим процессом воздушной сепарации. Их можно разделить на три группы:

1. Факторы, определяемые характеристиками используемого оборудования.

2. Факторы, определяемые свойствами отделяемых (сепарируемых) отходов.

3. Факторы, связанные с особенностями подачи отходов к устройству сепарации.

К первой группе факторов относятся следующие:

1.1. Расположение блока пневмодюз (в частности, угол наклона пневмодюз к плоскости подающего конвейера).

1.2. Величина давления в пневмодюзах.

1.3. Скорость конвейера, доставляющего материал в камеру сепарации.

1.4. Продолжительность открытия пневмодюз.

Направленность и сила воздействия этой группы факторов регулируются посредством изменения настроек оборудования. Исключение составляет лишь расположение блока пневмодюз, которое является фиксированным для каждой конкретной конфигурации оборудования и в дальнейшем не может быть изменено (в некоторых случаях может быть изменен угол наклона блока пневмодюз, однако его регулировка обычно нецелесообразна, так как производителем оборудования изначально выставляется оптимальное значение угла наклона).

Расположение блока пневмодюз определяет общий вид траектории полета отделяемого компонента.

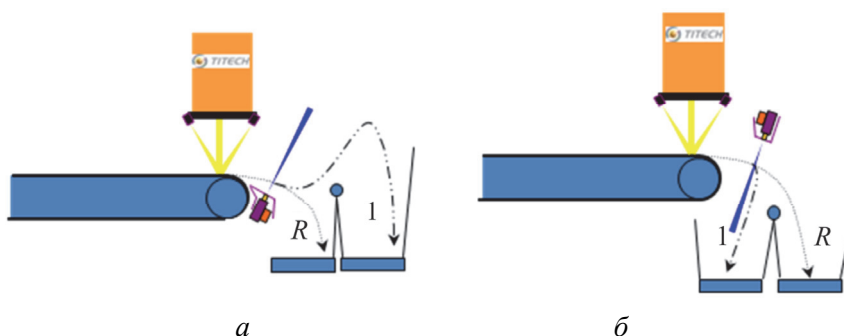


Рис. 2. Обычные варианты расположения блока пневмодюз [4]:
I – целевая (отделяемая) фракция; *R* – основной поток отходов

Блок пневмодюз обычно располагается или под подающим конвейером, или над ним (рис. 2). Если блок пневмодюз расположен снизу (рис. 2, *a*), то траектория полета будет приближаться к параболической (с учетом импульса, получаемого предметом в результате поступательного движения конвейера); если блок пневмодюз расположен

сверху (рис. 2, б), то траектория обычно приближается к линейной (так как импульс, получаемый предметом от струи сжатого воздуха, как правило, значительно выше импульса, полученного предметом от конвейера). Можно отметить, что вторая траектория полета является в целом более простой и предсказуемой, что позволяет легче добиваться нужной эффективности отстрела, однако первый тип расположения блока пневмодюз имеет определенные технологические преимущества.

В рамках каждого из вариантов расположения блока пневмодюз существуют различные подварианты, отличающиеся величиной угла наклона пневмодюз к плоскости движения предмета, сходящего с конвейера. Этот угол наклона определяет расположение «приемников» основного потока отходов и отделяемой фракции (отводящих, или реверсивных конвейеров) относительно друг друга и относительно подающего конвейера. Так, например, в случае, изображенном на рис. 2, а, угол наклона блока пневмодюз к плоскости конвейера, равный 45° , обеспечивает «отстрел» предмета на максимальное от подающего конвейера расстояние. С одной стороны, это может быть нежелательно из-за того, что сортировочная установка теряет компактность, с другой – это может позволить, например, при необходимости встроить в систему другие отводящие конвейеры.

Величина давления в пневмодюзах для сортировки ТБО обычно колеблется в пределах от 1,5 до 5 бар. Этим определяется величина силы, прикладываемой к отделяемому предмету. В общем виде для сепарации более тяжелых предметов необходимо большее давление, однако здесь немалую роль играют и габариты предмета, так как с увеличением размеров элемента увеличивается и число пневмодюз, которые могут быть задействованы для его «отстрела». Поэтому более тяжелые, но и более габаритные предметы могут отделяться при тех же (или даже при меньших) давлениях, что и более легкие, но зато более мелкие элементы.

Данный параметр является одним из первостепенных для успешной сепарации. Недостаточное давление снижает ее эффективность (так как материал «не долетает») до приемника, избыточное давление усиливает действие различных случайных факторов (рикошеты от стенок камеры сепарации, столкновения разных отстреливаемых элементов и т.п.), также могущих снизить эффективность сепарации.

Скорость конвейера, доставляющего материал в зону сепарации, определяет начальный импульс движения предмета: чем выше ско-

рость, тем выше импульс первоначального поступательного движения, тем дальше должен располагаться «приемник» (конвейер) для основного потока отходов (см. рис. 2, а). Следовательно, этот параметр также сильно зависит от конфигурации используемого сортировочного оборудования.

Скорость конвейера – первостепенный параметр. В общем случае увеличение скорости конвейера приводит к снижению качества сортировки отходов (даже в случае автоматической сортировки) – за счет усиления неконтролируемых перемещений предметов на ленте конвейера. Однако уменьшение скорости конвейера приводит к снижению производительности оборудования, поэтому необходим подбор оптимального значения.

Продолжительность открытия пневмодюз определяется временем прохождения предмета, падающего с конвейера, над блоком пневмодюз. Чем больше размер предмета (измеренный в направлении движения конвейера), тем дольше пневмодюзы будут оставаться открытыми. Для упрощения расчета траекторий полета обычно принимают, что весь импульс передается струями сжатого воздуха мгновенно. Однако в случае габаритных предметов (например, крупных кусков гофрокартона) это допущение может оказаться не вполне корректным, так как разные части предмета получают новый импульс не одновременно, и, соответственно, траектория полета предмета усложняется.

Увеличение времени открытия пневмодюз (в результате изменения настроек оборудования или при прохождении через установку габаритных предметов) может сказываться на эффективности сортировки (обычно в сторону уменьшения чистоты отбираемой фракции), поскольку возрастает вероятность того, что струей сжатого воздуха будут увлечены другие предметы, соседние с отделяемым (похожий эффект наблюдается и при увеличении давления воздуха выше определенной величины).

Фактор второстепенный, на практике он является фиксированным и, в отличие от других настроек (скорости конвейера и величины давления в пневмодюзах), пользователем не изменяется.

Ко *второй группе факторов* относятся следующие свойства отделяемых элементов ТБО:

- 2.1. Плотность.
- 2.2. Расположение центра масс.
- 2.3. Форма.

Эта группа факторов, наряду с величиной давления в пневмодюзах и скоростью конвейера, имеет первостепенное значение, но, как правило, не поддается регулировке (в некоторых случаях путем предварительной подготовки отходов можно изменить форму отделяемых элементов ТБО – прессование ПЭТ-бутылок и т.п.).

Плотность отделяемых элементов отходов напрямую определяет величину силы, которую необходимо приложить для того, чтобы отделить выбранный компонент. Она является итоговой функцией объема и массы предмета. Как уже указывалось, для сепарации более тяжелых предметов необходимо большее давление, однако пропорциональный рост объема предмета нивелирует необходимую «прибавку» давления за счет большего количества открываемых при сепарации пневмодюз.

Расположение центра масс отделяемых элементов отходов важно не само по себе, а относительно точки приложения силы «отстрела». В общем случае смещение центра массы предмета приводит к тому, что в движении «отстреливаемого» компонента появляется вращательный момент и ослабляется поступательная составляющая. Это уменьшает дальность полета и может приводить к отклонениям траектории, что снижает вероятность отделения предмета от основного потока. Однако даже если центр массы элемента смещен относительно его центральной оси, но струи сжатого воздуха воздействуют именно на центр масс (например, в результате перекрывания центральной части предмета этикеткой), то неблагоприятных эффектов (в виде «вращения» предмета и уменьшения дальности его полета) наблюдаться не будет. Такое совпадение на практике встречается редко, поэтому элементы отходов со смещенным центром масс отделяются хуже «однородных» компонентов. Например, вероятность отстрела пустой полиэтиленовой бутылки с массивной насадкой-распылителем заметно меньше, чем пустой полиэтиленовой бутылки схожей формы и такой же массы, но без насадки. Следует отметить, что большинство ресурсно ценных фракций ТБО, отбираемых при автоматической сортировке, слагаются относительно однородными элементами (картон, макулатура, дерево и др.); процент элементов с сильно смещенным центром массы невелик.

Форма отделяемого предмета определяет то сопротивление воздуха, которое данный предмет испытает при полете в камере сепарации. Влияние формы отделяемых элементов на эффективность сепара-

ции требует углубленных баллистических и аэродинамических исследований. В рамках данного исследования отметим лишь несколько моментов.

Увеличение площади поверхности предмета увеличивает аэродинамическое сопротивление его движению (полету) и снижает дальность полета. Увеличение обтекаемости предметов, наоборот, повышает эффективность отстрела.

Элементы, слагающие объемную фракцию ТБО (например, ПЭТ-бутылки), отделяются лучше, чем элементы плоской фракции (бумага, картон и др.) – для достижения заданной эффективности сепарации необходимо приложить меньшее давление, траектория полета более предсказуема, что увеличивает вероятность попадания на элемента на нужный отводящий конвейер и др. В ряде случаев значительные затруднения возникают при сепарации полимерных пленок ввиду их малой массы, большой площади поверхности, высокой парусности. Именно в случае полимерных пленок наблюдались наиболее значительные и многочисленные искажения траекторий полета от запроектированной (позволяющей «отстреливать» отходы на отводящий конвейер). Эффективная воздушная сепарация пленок (как и других элементов, обладающих небольшой массой и большой площадью поверхности) невозможна вне замкнутой камеры сепарации, которая сильно ограничивает «разлет» отделяемых компонентов.

К *третьей группе факторов*, связанных с особенностями расположения отходов на ленте подающего конвейера, относятся следующие:

3.1. Ориентация предметов на ленте конвейера.

3.2. «Кучность» расположения отделяемых элементов.

3.3. Плотность общего потока отходов на ленте конвейера.

Важным фактором является *ориентация предмета на ленте конвейера*, так как этот фактор также (наряду с формой предмета) определяет сопротивление воздуха, которое испытает отделяемый предмет. В наибольшей степени ориентация относительно стенок конвейера влияет на сепарацию предметов вытянутой формы, в наименьшей – на сепарацию предметов, все три измерения которых примерно одинаковы. При этом определенная ориентация на различные компоненты отходов влияет по-разному: так, например, эффективность «отстрела» полиэтиленовых и ПЭТ-бутылок заметно выше при их ориентации параллельно стенкам конвейера, а эффективность отстрела вытянутых листов гофрокартона (с соотношением сторон 2:1), наоборот, выше

при их ориентации перпендикулярно направлению хода конвейерной ленты. В этом случае разная направленность изменения эффективности отстрела обусловлена, по-видимому, особенностями формы изучавшихся компонентов (ПЭТ-бутылки и картонки в эксперименте имели примерно одинаковую массу и близкие линейные размеры).

В плане влияния на эффективность сепарации фактор первостепенный, но управление им затруднено. Существуют технические приспособления, позволяющие придавать загружаемым на подающий конвейер предметам определенную ориентацию, но это целесообразно только в случае монокомпонентных потоков отходов.

«Кучность» расположения отделяемых элементов влияет на эффективность сепарации постольку, поскольку на предметы начинают воздействовать движения воздуха в камере сепарации в результате прохождения струй сжатого воздуха от «отстрела» соседних предметов. Эффективность сепарации при этом может меняться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения – это зависит от вида отделяемого компонента (а точнее, от его плотности и формы). Так, например, было установлено, что при групповом распределении полиэтиленовых пакетов на ленте конвейера эффективность их сепарации повышается, в то время как эффективность «отстрела» фрагментов гофрокартона выше при их равномерной подаче.

Фактор является второстепенным и поддается целенаправленному регулированию только в случае монокомпонентных потоков отходов.

Плотность потока отходов определяет количество и степень перекрытий элементов друг другом. Помимо того, что такие перекрытия и наложения материалов снижают качество распознавания компонентов (что обсуждалось ранее), они также затрудняют процесс «отстреливания» компонентов, оказывая механическое сопротивление полету элементов. Это своеобразный фактор «сопротивления среды», который преодолевается путем равномерной и постепенной подачи отходов на конвейер, для чего существуют специальные технические приспособления (например, баллистические сепараторы). Иногда для решения этой задачи усложняют конфигурацию сортировочной станции, встраивая различные перегрузочные и «распушающие» конвейеры. Оба этих способа приводят к существенному увеличению затрат на оборудование. Альтернативный способ снижения плотности потока отходов до оптимальных значений – это ограничение скорости загруз-

ки отходов на конвейер (что приводит к снижению производительности мусоросортировочной станции).

Фактор имеет меньшее значение по сравнению с величиной давления в пневмодюзах, скоростью конвейера и свойствами отделяемых отходов.

С некоторой долей условности можно выделить еще и **четвертую группу факторов**, влияющих на эффективность воздушной сепарации, – это различные случайные факторы, основными из которых, по результатам проведенных исследований, являются:

4.1. Неконтролируемое смещение элементов отходов на ленте конвейера после прохождения сканера.

4.2. Сталкивание отделяемых элементов в камере сепарации и связанное с этим изменение их траекторий полета.

Эти факторы оказывают наименьшее влияние на конечный результат процесса сепарации, однако их необходимо учитывать для того, чтобы исключить возможные «провалы» в производительности автоматической сортировки при некоторых настройках оборудования.

Смещение предметов на ленте конвейера наблюдается в основном при повышенных скоростях конвейера (более 2,0–2,5 м/с). Оно происходит либо в результате «перекатывания» элементов объемной фракции (например, ПЭТ-бутылок), либо в результате «витания» элементов плоской фракции (полиэтиленовых пакетов и т.п.), а также их смещения под действием вихревых потоков воздуха, возникающих при высоких скоростях движения конвейера. Как уже указывалось, этот фактор оказывает влияние на эффективность сепарации, если он наблюдается на отрезке конвейерной ленты от сканера до блока клапанов. Если после сканирования идентифицированный предмет изменяет свое местоположение, то он либо уходит из зоны действия открываемых дюз, либо проходит их с опережением или запозданием, избегая воздействия сжатого воздуха.

Данный фактор при его активном проявлении резко снижает эффективность воздушной сепарации. Но он проявляется в основном в монокомпонентных потоках ТБО (например, в потоке ПЭТ-бутылок, сортируемых по цвету). В потоке смешанных отходов (особенно в плотном потоке) отдельные элементы, как правило, не имеют достаточной свободы перемещения (при этом, однако, неизбежно возрастает фактор «сопротивления среды», о котором было сказано ранее). При необходимости сортировки монокомпонентных потоков отходов для

устранения этого фактора может проводиться предварительная подготовка отходов (например, деформация ПЭТ-бутылок с целью недопущения их «раскатывания» по конвейерной ленте).

Сталкивание отделяемых элементов в камере сепарации наблюдается в основном при высокой «кучности» расположения этих элементов на конвейерной ленте. Иногда отделяемые элементы могут сталкиваться с элементами других, нецелевых фракций, случайно увлеченных струями сжатого воздуха. По нашим наблюдениям, этот фактор проявляется достаточно редко, а его влияние на итоговый результат сепарации обычно оказывается в пределах ошибки опыта.

Группировка основных факторов, влияющих на эффективность воздушной сепарации, представлена на рис. 3.



Рис. 3. Обзорная схема факторов, влияющих на эффективность воздушной сепарации. Величина шрифта пропорциональна значимости фактора

Одним из недостатков автоматической сортировки отходов, в отличие от ручной, считается невозможность одновременного выделения

нескольких (более двух) компонентов отходов. В обычном случае с помощью одного блока пневмодюз в одном цикле работы установки удастся отделить только один компонент (т.е. разделить основной поток отходов на два). Для выделения второго и последующих компонентов необходимо использовать дополнительные блоки пневмодюз. На рис. 4 показаны варианты одновременного выделения двух компонентов отходов из общего потока ТБО.

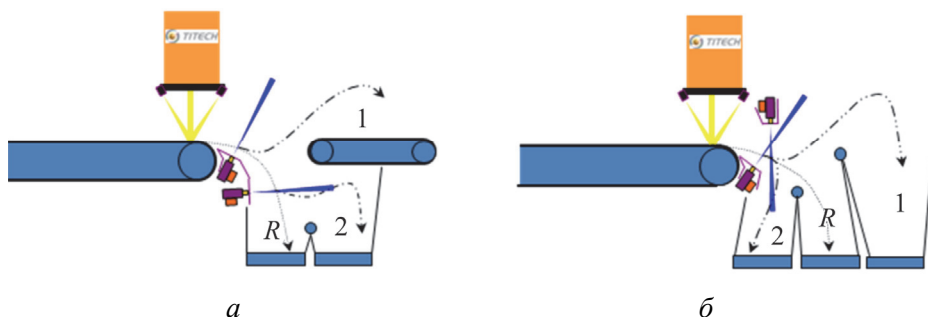


Рис. 4. Сортировка отходов с помощью двух блоков пневмодюз [4]:
 1 – первая целевая (отделяемая) фракция; 2 – вторая целевая фракция;
 R – основной поток отходов

Как видно из рис. 4, расположение одного из блоков пневмодюз под конвейером является обязательным; только на базе такой конфигурации оборудования можно создать систему «двойной сепарации».

В случае использования трех и более блоков пневмодюз происходит очень существенное увеличение капитальных и эксплуатационных затрат на оборудование. Как правило, для выделения большего количества компонентов увеличивается число циклов работы установки, что снижает общую производительность сортировочной станции и увеличивает эксплуатационные затраты.

Анализ факторов, определяющих эффективность воздушной сепарации, дает основания полагать, что одновременное выделение нескольких (в частности, двух) компонентов из общего потока отходов можно осуществить с помощью одного блока пневмодюз – в случае, если для «отстрела» каждого компонента будет использоваться своя специфическая величина рабочего давления. При этом управляющий сигнал, подаваемый со сканера на блок пневмодюз, должен будет нести дополнительную информацию о величине давления сжатого воздуха, подаваемого на «отстреливаемый» компонент.

Если будет создана возможность регулировать величину давления сжатого воздуха в пневмодюзах в ходе процесса сортировки (такая возможность в стандартных комплектациях сортировочного оборудования в настоящее время не предусматривается), тогда отделяемые компоненты будут направляться по разным параболическим траекториям и рассортировываться на разные разгрузочные конвейеры. Такое решение позволит снизить стоимость оборудования и упростить его конструкцию (так как подвод сжатого воздуха будет необходим только к одной точке).

Подобное технологическое решение, принципиально возможное, нуждается в дополнительной экспериментальной проработке в ходе модельных экспериментов, а также в поиске соответствующих инженерных решений, позволяющих оперативно и в автоматическом режиме регулировать давление в блоке пневмодюз.

Выводы

1. Выделяется несколько основных групп факторов, влияющих на эффективность воздушной сепарации компонентов отходов в процессах автоматической сортировки ТБО: это факторы, связанные с характеристиками оборудования; факторы, связанные со свойствами отсортировываемых материалов; факторы, связанные с особенностями подачи отходов в зону сепарации, и различные случайные факторы.

2. Многие из этих факторов тесно связаны друг с другом и воздействуют на эффективность «отстрела» компонентов не напрямую (или не только напрямую), а посредством модификации действия других факторов. Так, например, увеличение скорости подающего конвейера приводит не только к увеличению исходного импульса у отделяемых элементов ТБО, но и к усилению одного из случайных факторов, связанных с неконтролируемым смещением предметов на ленте конвейера.

3. Для достижения заданного результата автоматической сортировки отходов следует подобрать оптимальные значения всех факторов, определяемых техническими характеристиками оборудования, установить необходимость предварительной подготовки отходов (с целью воздействия на другую группу факторов), разработать и обеспечить правильный режим подачи отходов в зону сепарации, а также – при необходимости – принять меры к ослаблению и устранению случайных факторов, снижающих эффективность сепарации.

4. Существует принципиальная возможность выделения из основного потока отходов двух и более целевых компонентов с помощью одного блока пневмодюз – в качестве альтернативы существующей практике использования нескольких блоков.

Настоящая работа выполнена в рамках реализации соглашений о предоставлении и целевом использовании субсидии для реализации научных проектов международными исследовательскими группами ученых на базе государственных образовательных учреждений Пермского края.

Список литературы

1. Ильиных Г.В. Оптико-механическая сортировка отходов: перспективы использования // Твёрдые бытовые отходы. – 2013. – № 10. – С. 35–39.

2. Вюнш К., Вайсман Я.И., Коротаев В.Н. Основные направления исследований с применением комплекса оборудования глубокой оптико-механической сортировки потоков отходов и материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 28–37.

3. Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Слюсарь Н.Н. Современные методические подходы к анализу морфологического состава ТБО с целью оценки их ресурсного потенциала // Экология и промышленность России. – 2012. – № 7. – С. 40–45.

4. TOMRA Investor Presentation [Электронный ресурс] // TOMRA Sorting solutions. – 2013. – URL: <http://mb.cision.com/Public/4659/9482984/939145a182f284d7.pdf> (дата обращения: 09.06.2014).

References

1. Il'inykh G.V. Optiko-mekhanicheskaia sortirovka otkhodov: perspektivy ispol'zovaniia // [Sensor-based sorting of waste: usage perspectives]. *Tverdye bytovye otkhody*, 2013, no. 10, pp. 35-39.

2. Viunsh K., Vaisman Ia.I., Korotaev V.N. Osnovnye napravleniia issledovaniia s primeneniem kompleksa oborudovaniia glubokoi optiko-mekhanicheskoi sortirovki potokov otkhodov i materialov [The main directions of research using the deep optical-mechanical sorting of waste and ma-

terial flows equipment]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznediel'nosti*, 2013, no. 2, pp. 28-37.

3. Il'nykh G.V., Korotaev V.N., Sliusar' N.N. Sovremennye metodicheskie podkhody k analizu morfologicheskogo sostava TBO s tsel'iu otsenki ikh resursnogo potentsiala [Modern methodological approaches to the morphological composition analysis of MSW to assess their resource potential]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2012, no 7, pp. 40-45.

4. TOMRA Investor Presentation. TOMRA Sorting solutions. 2013, available at: <http://mb.cision.com/Public/4659/9482984/939145a182f284d7.pdf> (accessed 9 June 2014).

Получено 18.10.2014

Об авторах

Борисов Дмитрий Леонидович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Автомобили и технологические машины» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: d-borisov@mail.ru).

Филькин Тимофей Геннадьевич (Пермь, Россия) – научный сотрудник кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: filkin-t@yandex.ru).

Коротаев Владимир Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды», проректор по науке и инновациям Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: korotaev@pstu.ru).

About the authors

Borisov Dmitrii Leonidovich (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Automobiles and Technological Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: d-borisov@mail.ru).

Filkin Timofei Gennad'evich (Perm, Russian Federation) – Research Associate, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: filkin-t@yandex.ru).

Korotaev Vladimir Nikolaevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Environmental Protection, Vice-Rector for Science and Innovations, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: korotaev@pstu.ru).