

УДК 504.064.4

**И. В. КОРИНЬКО**, докт. техн. наук, генеральный директор,  
**Н. П. ГОРОХ**, руководитель комплекса  
ГКП «Харьковкоммуночиствод», г. Харьков

## ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Предварительная сортировка оптимизирует производства при комплексной переработке ТБО, улучшая и ускоряя процесс ферментации органических веществ в составе ТБО; состав продукта ферментации, шлака и отходящих газов при термической обработке остатка недосортированной части отходов. При этом упрощается дорогостоящий процесс газоочистки. Технология комплексной переработки ТБО повышает экологичность и экономичность традиционной термической и биотермической обработки, а также сортировки муниципальных отходов.

**комплексная переработка, эколого-экономические аспекты, промышленная переработка, техногенное сырье, обезвреживание отходов**

### АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В Украине ежегодно образуется около 33 млн м<sup>3</sup> (9 млн т при коэффициенте плотности 0,25–0,27 т/м<sup>3</sup>) бытовых отходов, которые вывозятся на 770 полигонов ТБО, а общий объем их накопления достигает 3 млрд м<sup>3</sup>.

В Украине наиболее распространенный способ обращения с бытовыми отходами – полигонное складирование и захоронение ТБО. Большинство полигонов работают в режиме перегрузки, а 80 % из них не соответствуют требованиям экологической безопасности.

Метод термической обработки отходов на мусоросжигательных заводах позволяет уменьшить их количество в 3 раза, но при сжигании ТБО образуются токсичные выбросы в атмосферу, а шлаки и зола, накопившиеся в результате сжигания, становятся более токсичными и требуют дальнейшей специальной обработки.

В Украине методы комплексной механизированной переработки ТБО с целью извлечения ресурсно-ценных сырьевых компонентов на практике пока не реализованы.

Преимущество комплексной переработки ТБО выявляет укрупненная эколого-экономическая оценка наиболее распространенных промышленных технологий переработки отходов – сжигания, ферментации (компостирования), механизированной сортировки и их комбинаций.

### ТЕНДЕНЦИЯ ПЕРЕХОДА К КОМПЛЕКСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Основная тенденция решения проблемы ТБО в мировой практике – их вовлечение в промышленную переработку.

Несколько причин стимулируют переход к промышленной переработке ТБО:

- наличие постоянной экологической опасности от накопления больших объемов отходов;
- сложность выделения и обустройства новых свалочных мест;
- рост затрат на захоронение ТБО и их доставку к местам захоронения, которые все более удаляются от городов;
- экономия земельных ресурсов при отказе от полигонного захоронения;
- возможность масштабной утилизации муниципальных отходов при их вовлечении в промышленную переработку;
- необходимость решения экологических проблем цивилизованными методами.

В первую очередь ТБО вовлекаются в промышленную переработку в регионах, имеющих дефицит природных ресурсов и отличающихся малой площадью и высокой плотностью населения.



В мировой практике нашли промышленное применение пять *принципиальных методов* переработки ТБО:

- термическая обработка (в основном – сжигание);
- биотермическая аэробная ферментация (с получением удобрения, биотоплива, топлива и др.);
- анаэробная ферментация (с получением биогаза);
- сортировка (с извлечением ценных компонентов и фракций отходов для вторичного использования);
- комплексная переработка (комбинация различных методов: ферментация-сортировка, ферментация-сортировка-термообработка, сортировка-ферментация, термообработка-сортировка, сортировка-термообработка-ферментация).

Принципы выбора и создания рациональных методов промышленной переработки ТБО базируются на том, что проблема ТБО – это взаимосвязанная эколого-экономическая и технологическая проблема, а сами ТБО должны рассматриваться как техногенное сырье сложного органоминерального состава. Технологию переработки ТБО следует рассматривать как метод инженерной защиты окружающей среды. Задачей любой технологии является:

- уменьшение объема и массы отходов, подлежащих захоронению, с перспективой перехода на безотходное производство;
- обезвреживание отходов;
- рациональная утилизация отходов (материальная и энергетическая, с выделением ценных компонентов, производством новых видов товарной продукции).

### **КРИТЕРИИ ВЫБОРА БЕЗОТХОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ**

Приоритетными при выборе и создании технологии, отвечающей достижениям и тенденциям развития мировой практики, являются эколого-экономические критерии (экологическая безопасность технологии, количество и экологическая безопасность образующихся отходов, экологическая безопасность новой продукции, экономическая эффективность, капитальные и эксплуатационные затраты). Естественно, на выбор технологии существенное влияние оказывает степень ее отработанности и готовности к практическому применению.

Принципиальные методы переработки ТБО реализуются с использованием десятков технологий. Как правило, любая фирма-разработчик технологии (или дилерская фирма) рекламирует свою технологию как лучшую и самую эффективную в мировой практике. Чтобы сделать правильный выбор, – в рынке технологий необходимо

разбираться. Практическое решение проблемы промышленной переработки ТБО связано с большими капитальными вложениями, поэтому последние должны быть ориентированы на создание наиболее прогрессивного промышленного производства.

Промышленную переработку следует рассматривать как конечную операцию в общей схеме управления ТБО, эффективность которой во многом зависит от организации работы на каждой предшествующей стадии сбора и транспортировки (удаления) муниципальных отходов.

Исходя из гетерогенного состава муниципальных отходов, схемы управления ТБО (включая промышленную переработку) должны представлять собой комбинацию технологических операций разделения отходов на отдельные фракции и компоненты с последующей их переработкой оптимальным методом. Стремление использовать для переработки всей массы ТБО какой-то один конкретный метод, какую-то монотехнологию (например, сжигание) приводит к неоправданному увеличению затрат и усиливает негативное влияние на окружающую среду. В наибольшей степени современным требованиям экологии, экономики и ресурсосбережения отвечает создание комбинированного производства, обеспечивающего обезвреживание отходов, использование отходов как источника энергии и как вторичного сырья. Построение промышленной технологии по принципу комбинации различных методов переработки ТБО нивелирует недостатки каждого метода, взятого в отдельности. Именно комплексная переработка ТБО как системная комбинация сортировки, термообработки, ферментации и других процессов обеспечивает в совокупности малую отходность производства, его максимальную экологичность и экономичность.

Объединяющим процессом в схеме комплексной переработки ТБО является сепарация (в том числе, на основе селективного сбора), изменяющая качественный и количественный состав ТБО.

Отходы, подходящие для переработки, теоретически охватывают почти все потребительские отходы. Но на практике приходится выбирать между их количеством и качеством. Некоторые аналитики считают, что более половины всех отходов можно эффективно переработать, но достижение такой эффективности требует огромной осторожности в обращении с ними.

### **ВЕРИФИКАЦИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ**

Построение технологической схемы любого производственного процесса определяется составом и свойствами исходного сырья, а также задачами производства. Посколь-



Таблица 1.

Экономическая эффективность различных технологий переработки ТБО

Показатели	Технологии					
	Сжигание	Компостирование	Сортировка + сжигание	Сортировка + компостирование	Комплексная переработка	Сортировка + компактирование
Удельные капитальные вложения (на 1 т ТБО), долл./т	280	90	330	100	240	44
Удельные эксплуатационные затраты (на 1 т ТБО), долл./т	9,6	10	12,8	8,7	13,5	3,5
Неутилизируемая фракция (подлежит захоронению), %	30	30	15	55	8	60
Удельные затраты на захоронение не утилизируемой фракции, долл./т <sup>**</sup>	9	9	4,5	16,5	2,4	18
Норма амортизационных отчислений, % <sup>***</sup>	10	10	10	10	10	10
Приведенные капитальные затраты, долл./т	28	9	33	10	24	4,4
Общие удельные затраты, долл./т	46,6	28	50,3	35,2	39,9	25,9
Суммарная реализация продукции из 1 т ТБО, долл./т	23,7	9,2	33,9	18,7	30,2	34
Экономическая эффективность технологий, долл./т	-22,9	-18,8	-16,4	-16,5	-9,7	8,1

<sup>\*</sup> Технология «сортировка + компактирование» рассчитана на вовлечение в переработку только отходов нежилого сектора города.

<sup>\*\*</sup> Удельные затраты на захоронение ТБО приняты 30 долл. США/т.

<sup>\*\*\*</sup> Норма амортизационных отчислений условно принята 10 % (для всех технологий)

ку ТБО представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава, то не существует, как показывает анализ, какого-либо одного универсального метода их переработки, удовлетворяющего современным требованиям экологии, экономики, ресурсосбережения и рынка. Этим требованиям, тенденциям развития мировой практики, рекомендациям международных экологических конгрессов в наибольшей степени отвечает проектирование и строительство комбинированных мусороперерабатывающих заводов, обеспечивающих использование отходов как источника энергии и как вторичного сырья.

Существует несколько промышленных и близких к промышленному применению технологий экологически безопасного обезвреживания и переработки образующихся отходов, в составе которых преобладают ресурсно-ценные сырьевые компоненты. При этом повышается не только доля повторного использования ряда компонентов ТБО, но и

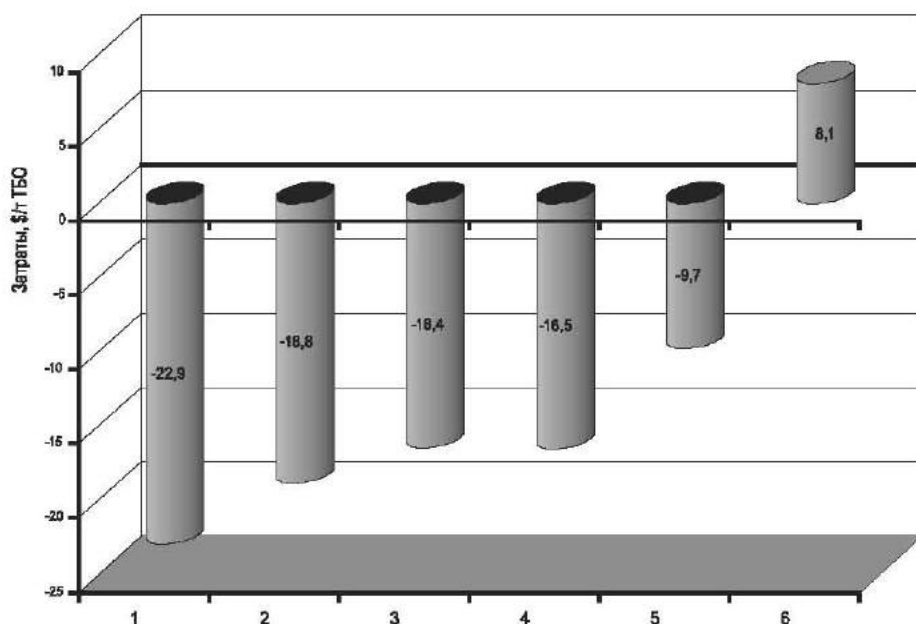


Рис. 1. Экономическая эффективность различных технологий переработки ТБО:

1 – сжигание; 2 – компостирование; 3 – сортировка + сжигание; 4 – сортировка + компостирование; 5 – комплексная переработка; 6 – сортировка + компактирование

во многом решаются вопросы удаления опасных бытовых отходов и балластных компонентов, оптимальной подготовки тех или иных фракций компонентов ТБО к дальнейшей переработке.



Выполненные расчеты дают объективную, качественную, сравнительную оценку различных технологий. Их можно корректно использовать только в рамках поставленной задачи для сопоставления различных способов переработки ТБО.

В качестве исходных данных для анализа технологий переработки ТБО принята условная производительность – 240 тыс. т ТБО в год (завод обслуживает около 0,6–1,0 млн жителей – среднестатистическая численность региональных центров Украины).

Некоторые экономические показатели различных технологий переработки ТБО (по данным европейских фирм, дополненным расчетными данными по комплексной переработке ТБО и расчетными данными по реализации готовой продукции) приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Сравнительная качественная оценка принципиальных способов переработки ТБО по экономическим критериям (удельные капитальные, эксплуатационные и приведенные затраты, удельные затраты на захоронение не утилизируемой части ТБО, прибыль от реализации продукции из 1 т ТБО) показывает (рис.1), что строительство заводов по технологии прямого сжигания, а также прямого компостирования ТБО экономически наименее целесообразно (практика СНГ). В экономическом плане, как следует из рис. 1, для переработки неразделенных потоков ТБО наиболее предпочтительны комбинационные технические решения, в особенности, комплексная переработка ТБО (комбинация процессов сортировки,

термо- и биообработки). Однако без учета тарифов за прием ТБО все эти технологии убыточны. Единственной самокупаемой является технология раздельного сбора и сортировки отходов нежилого сектора города (первый этап решения проблемы ТБО).

Ниже (табл. 2) показано влияние процесса сортировки на перераспределение материальных потоков отходов между термическим и биотермическим переделами в случае комбинации технологий (комплексная переработка ТБО), что является технически целесообразным и обеспечивает повышение экономической и экологической эффективности производства (технология ферментации условно рассчитана на использование биобарабанов, выпускаемых отечественной промышленностью и в странах СНГ).

Из табл. 2 следует, что в результате механизированной сортировки исходных ТБО выход фракции, направляемой на ферментацию, составляет около 57 % от исходного (137140 т/г. при работе 305 дней в году), а фракции, направляемой на сжигание, – около 37 % (87980 т/г. при работе 340 дней в году).

После очистки продукта ферментации от примесей в отходы перейдет около 25 % материала, поступившего на ферментацию, что составит 34285 т за 305 суток работы или 112,4 т/час. Затем эти отходы направляются на сжигание.

Таким образом, в цех термообработки поступает: 87980 т/г. (из цеха сортировки) и 34285 т/г. (из цеха фер-

Таблица 2.

**Ориентировочный материальный баланс процесса сортировки ТБО (цех работает 340 дней в году, по 12 часов в сутки. При этом поступает исходных ТБО: 240 тыс. т/г., 705 т/сут, около 60 т/час)**

Наименование продуктов	Содержание в исходном, %	Выход			
		Извлечение, %	%	т/год	т/сут
Черный металлолом (включая оловосодержащий)	3,0	98	2,94	7056	20,75
Цветной металлолом	0,5	80	0,4	960	2,82
Легкая фракция (на сжигание)	30,0	45	13,5	32400	95,29
Текстильные компоненты (на сжигание)	6,0	80	4,8	11520	33,88
Крупногабаритные компоненты (на сжигание)	2,0	90	1,8	4320	12,7
Балластные компоненты (стеклобой, батарейки и др. отходы)	7,0	40,0	2,8	6720	17,76
Механические потери с крупногабаритной фракцией (на сжигание)	–	–	10,0	24000	70,58
Потери (влага, пыль)	–	–	0,06	144	0,42
Обогащенная органическая фракция (на ферментацию)	–	–	63,7	152880	449,64
Реальное количество обогащенной органической фракции, принимаемое цехом ферментации при работе 305 дней в году	–	–	57,14	137140	449,64
На сжигание из цеха сортировки (суммарно за 340 дней)	–	–	36,65	87980	258,76
<b>Итого:</b>	–	–	–	<b>24000</b>	<b>705</b>

ментации), т. е. суммарно 122265 т/г. (359,6 т/сут, или около 15 т/час). Иными словами, в случае комплексной переработки на сжигание направляется около 50 % от исходных ТБО (вместо 100 % при использовании технологии прямого сжигания исходных ТБО). Это обуславливает сокращение потребности в весьма дорогостоящем термическом оборудовании в два раза.

Аналогично сокращается потребность в биобарабанах для установки в цехе ферментации. Так, при отсутствии сортировки для прямой ферментации исходных ТБО (практика заводов СНГ) в количестве 240 тыс. т/г. (786,8 т/сут при работе в три смены 305 дней в году) потребовалась бы установка 11 биобарабанов марки КМ101А диаметром 4 м и длиной 36 м (полезный объем – 300 м<sup>3</sup>). Тогда, в соответствии с данными практики Нижегородского завода РФ, годовая производительность одного биобарабана составляет 21,5 тыс. т или 71 т/сут, т. е. общая потребность в биобарабанах составляет 786,8 : 71 = 11.

При использовании технологии комплексной переработки на ферментацию направляется 137140 т/г. обогащенной фракции ТБО и к установке требуется всего 6 биобарабанов (449,6:71=6), т. е. почти в два раза меньше (даже без учета увеличения плотности обогащенной фракции по сравнению с исходными ТБО).

На примере этого простого расчета наглядно выявляется эффективность первичной сортировки как подготовительной операции в процессе комплексной переработки ТБО (по существу, технология комплексной переработки является универсальной, т. к. мало зависит от состава исходных ТБО).

Перераспределяя материальные потоки отходов, сортировка в 1,5–2 раза сокращает потребность в дорогостоящем термическом и биотермическом оборудовании. В то же время капитальные затраты на саму сортировку не превышают 8–15 % от затрат на термо- и биообработку.

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ТБО

Для научно обоснованного выбора той или иной технологии необходимо учитывать не только экономические, но и экологические факторы, поскольку конечные продукты переработки и отходы производства не должны наносить вред окружающей среде (при этом ценные компоненты ТБО должны быть максимально использованы).

Наибольшее экологическое влияние на окружающую среду из рассматриваемых технологий оказывают тех-

нологии прямой ферментации и прямого сжигания исходных ТБО.

Выбросы тяжелых металлов как основных токсичных ингредиентов можно уменьшить за счет предварительной сортировки ТБО с извлечением полимерных отходов, черных и цветных металлов. По данным зарубежных исследований, предварительная сортировка ТБО на порядок снижает содержание тяжелых металлов в отходящих газах и является важнейшим первичным мероприятием по уменьшению токсичных выбросов.

Недостатки каждого метода переработки ТБО нивелируются, если промышленную технологию строить по принципу комбинации отдельных методов переработки ТБО.

При использовании технологии комплексной переработки в термообработку поступают не исходные ТБО, а их обогащенная фракция, из которой в основном удалены металлы, полимеры, макулатура, – причем масса обогащенной фракции в два раза меньше, чем исходных ТБО. Отсюда резко снижается экологическое влияние дымовых газов, так как их объем значительно уменьшается.

Зола, образующаяся в процессе комплексной переработки ТБО при очистке дымовых газов, является токсичной, но в настоящее время разрабатываются методы ее обезвреживания не только с целью захоронения, но и последующей утилизации (например, путем переработки золы в инертный стекловидный остаток, который может использоваться в дорожном строительстве, в качестве добавок к бетону, для струйной очистки изделий и т. п.). Кроме того, уже разработаны термические технологии, в которых отсутствует пылевынос (русская технология газификации).

Таким образом, по «экологичности» отходов промышленные технологии можно расположить в два параллельных ряда (качественная оценка): технологии с использованием термических методов и без использования термических методов.

Технологии, использующие термические методы, в порядке возрастания отрицательного экологического влияния располагаются в ряд:

- комплексная переработка;
- сортировка + сжигание;
- сжигание.

Соответственно технологии, не использующие термические методы, располагаются в ряд:

- ферментация;
- сортировка + ферментация.

Технологии прямой ферментации исходных ТБО и «сортировка + ферментация» равноценны по экологическому влиянию отходов лишь при условии реализации легкой фракции и текстильных компонентов как товарной продукции, что весьма затруднено. Применение технологий «сортировка + ферментация» необходимо для





существенного улучшения качества конечного продукта (например, для использования в качестве удобрения).

С точки зрения «экологичности» готовой продукции все технологии, за исключением технологии прямой ферментации исходных ТБО, практически равноценны.

Как отмечено, по технологии прямой ферментации исходных ТБО получается продукт весьма низкого качества, вследствие чего она является наименее перспективной.

Поскольку по «экологичности» готовой продукции остальные технологии условно можно считать равноценными, все технологии можно расположить в следующий ряд:

1-4) комплексная переработка; сортировка + ферментация; сортировка + сжигание; сжигание.

5) ферментация.

Для суммарной оценки технологий переработки ТБО можно оценить по шестибалльной системе (1 место – 6 баллов, 2 место – 5 баллов и т. д.) в обоих приведенных рядах. В случае разделения мест сумма баллов за эти места распределяется поровну (например, в случае деления 1 и 2 мест обе технологии получают по 5,5 балла). Суммарная оценка в баллах технологий переработки ТБО приведена на рис. 2, из которого следует, что технологии располагаются практически в тот же ряд, что и по экономическим показателям.

Таким образом, анализ показывает, что современным экономическим и экологическим требованиям в наибольшей степени соответствует технология комплексной переработки ТБО.

Стремление использовать для переработки всей массы ТБО какой-то один конкретный метод, какую-то монотехнологию (например, сжигание) приводит к неоправданному увеличению затрат и усиливает негативное влияние технологии на окружающую среду. При этом некоторые термические технологии (газификации, сжигания в кипящем слое) могут быть реализованы только в схемах комплексной переработки ТБО, так как предъявляют определенные требования к составу, крупности и теплотворной способности сырья как объекта для переработки. Для практического вовлечения ТБО в комплексную переработку необходим обоснованный выбор комбинации

онных технических решений (ориентированный на использование наиболее прогрессивных разработок) и их системное объединение (исходя из характера взаимосвязей между отдельными технологическими операциями как элементами общей системы сортировки и переработки ТБО) с детальным анализом.

На рис. 3 приведен один из вариантов возможных прогрессивных технологических схем комплексной переработки ТБО.

В основе всех схем лежит механизированная сепарация ТБО (возможно применение операции ручной сортировки крупнокусковой фракции). Отличие технологических схем сортировки связано с реализацией операции вторичного грохочения: в одной из схем эта операция может не использоваться, а в двух других она осуществляется по разным классам крупности (60 мм и 100 мм), что объясняется различным целевым назначением комплексной переработки ТБО (в части выпуска готовой продукции) и экономическими соображениями (снижение капитальных затрат на дорогостоящие передельные переработки). Механизированная сортировка исходных ТБО и продуктов ферментации обеспечивает извлечение в самостоятельные продукты черных и цветных металлов, выделение горючей и биоразлагаемой фракции (последняя пригодна для ферментации и для производства строительных материалов), а также удаление опасных компонентов (фракция – 65 + 40 мм обогащена отработанными сухими гальванозементами).

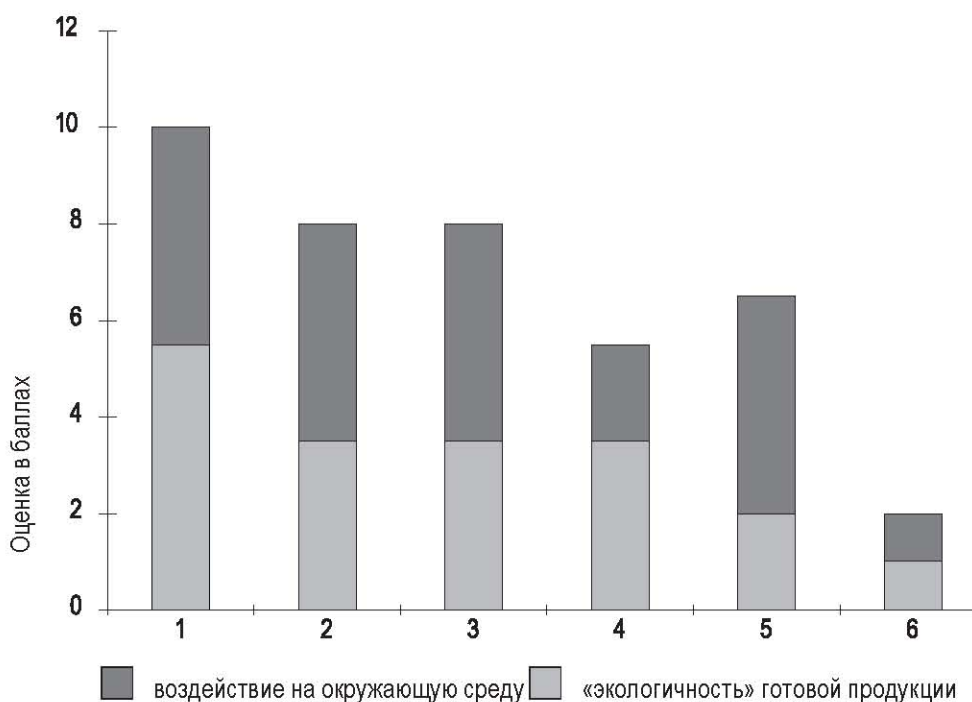


Рис. 2. Экологическая оценка методов переработки ТБО:

- 1 — комплексная переработка; 2 — сортировка + ферментация;  
3 — сортировка + сжигание; 4 — ферментация; 5 — сжигание

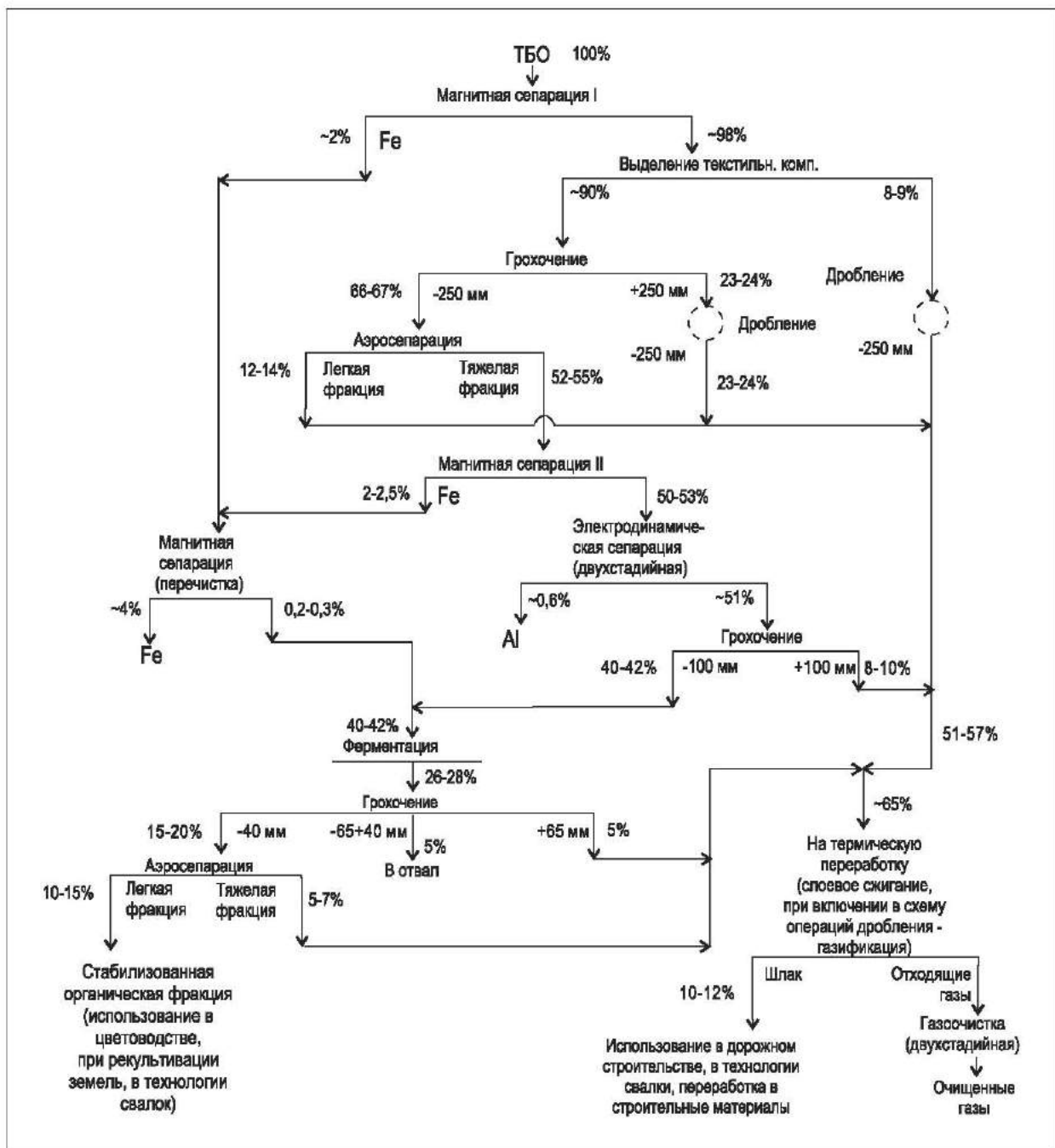


Рис. 3. Технологическая схема комплексной малоотходной переработки ТБО (комбинация процессов сортировки, термо- и биообработки)

### ВЫВОДЫ

Номинально комплексная переработка твердых бытовых и промышленных отходов, в равной мере как и политика комплексного управления отходами, предусматривает приоритетность минимизации отходов.

Практически все более интенсивно обсуждается фактор влияния на окружающую среду мусоросжигательных заводов (МСЗ). Несмотря на усовершенствования МСЗ и внедрение новейших технологий очистки отходящих газов, технологии, используемые муниципальными МСЗ (в

Украине их 4, один из них эффективно действует в г. Киеве), по-прежнему входят в число основных «грязных» технологий термической обработки отходов.

Исследования и модельные расчеты отдельных западных технологий комплексной переработки отходов доказывают экономическую эффективность сбережения 0,8 тут на каждую тонну использованных отходов или 17 млн тут на каждые 10 % муниципальных ресурсноценных компонентов в составе ТБО.

Таким образом, преимущество предприятий комплексной переработки бытовых отходов заключается в том, что



они представляют собой упрощенную (и потому более дешевую) альтернативу термической переработке на МСЗ.

Комплексная переработка ТБО может предусмотреть модульную гибкую структуру, в рамках которой, в зависимости от вторичного сырья, извлекаемого из ТБО, возможно применять различные методы подготовки и переработки с изготовлением технологического оборудования, ранее апробированных технологий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горох Н. П., Внукова Н. В., Шубов Л. Я. Технологические основы промышленной переработки отходов мегаполиса: Уч. пособие. – Харьков: ХНАДУ, 2005.

Попереднє сортування оптимізує виробництва під час комплексної переробки ТПВ, що покращує і прискорює процес ферментації органічних речовин у складі ТПВ; склад продукту ферментації шлаку і відхідних газів під час термічної переробки залишку недосортованої частини відходів. При цьому спрощується процес газоочищення, який дорого коштує. Технологія комплексної переробки ТПВ підвищує екологічність та економічність традиційної і біотермічної обробки та сортування муніципальних відходів.

2. Горох Н. П., Саратов И. Е., Юрченко В. А. Полимерные отходы в коммунальном хозяйстве города: Уч. пособие. – Харьков: ХНАГХ, 2005.
3. Экология города / Под редакцией Ф. В. Стольберга. – Киев: Либерта, 2000.
4. Шубов Л. Я., Ставровский М. Е., Шехирев Д. В. Технология отходов мегаполиса (технологические процессы в сервисе). – Москва, 2002.
5. Державна програма поводження з твердими побутовими відходами в Україні. (Утверждена Постановлением КМ Украины от 04. 03. 2004, № 263).
6. Робин Мюррей. Цель – Zero West / Перевод с английского В. О. Горницкого – М: 2004.

Preliminary sorting optimizes complex processing of solid household wastes, improving and speeding up the process of organic matters fermentation in the SHW compound; improving the formula of the fermentation product, slag and waste gases at thermal processing of the rest non-sorting part of wastes. Thus, expensive process of gas cleaning becomes simpler. The technology, in question, provides more environmental friendly and economic favorable conditions of the traditional thermal and biothermal processing and also sorting of municipal waste products.