

**Е. А. Васильева
О. А. Шанова**

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ**

Учебно-методическое пособие

**Санкт-Петербург
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**Е. А. Васильева
О. А. Шанова**

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ

Учебно-методическое пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2023

УДК 628.4.03:628.47 (07)

ББК 38.941.4

В 191

Рецензенты:

кандидат технических наук, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических технологий Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна

А. О. Никифоров;

заместитель генерального директора по производству НПФ «Кортекс»

Б. С. Иоффе

Васильева, Е. А.

В 191 Технология обезвреживания и использования отходов: учебно-методическое пособие / Е. А. Васильева, О. А. Шанова. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. — 72 с.

Учебно-методическое пособие соответствует программе и учебному плану дисциплины «Технология обезвреживания и использования отходов» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 18.04.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

В учебно-методическом пособии приведены нормативные требования и общие сведения о технологиях и подходах к утилизации и обезвреживанию некоторых типовых отходов. Методики расчета, приведенные в пособии, могут быть использованы для решения практических задач при организации утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления, а также для написания курсовых проектов и выпускных квалификационных работ.

Настоящее пособие предназначено для подготовки студентов магистратуры очной и заочной форм обучения. Отдельные разделы пособия могут быть полезны учащимся аспирантуры и слушателям в системе дополнительного профессионального образования.

УДК 628.4.03:628.47 (07)

ББК 38.941.4

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

© Васильева Е. А., Шанова О. А., 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ.....	5
1.1. Выбор направления обращения с отходами.....	5
1.2. Выбор технологии утилизации и обезвреживания.....	11
2. УТИЛИЗАЦИЯ И ЛИКВИДАЦИЯ ОТХОДОВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ	14
2.1. Отходы синтетических полимеров	14
2.2. Утилизация отходов синтетических полимеров.....	19
2.3. Выбор и расчет основного оборудования для утилизации полиолефинов методом экструзии	23
3. УТИЛИЗАЦИЯ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ МАСЕЛ.....	30
3.1. Отходы автомобильных масел	30
3.2. Утилизация отходов автомобильных масел.....	35
3.3. Выбор и расчет основного оборудования для утилизации автомобильных масел адсорбцией	37
3.4. Выбор и расчет основного оборудования для утилизации автомобильных масел сепарацией.....	42
4. ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ	47
4.1. Классификация и общие сведения о методах обезвреживания отходов... 47	
4.2. Обезвреживание органосодержащих отходов путем анаэробной ферментации	56
4.3. Выбор и расчет оборудования для анаэробной ферментации органосодержащих отходов	60
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	63
ПРИЛОЖЕНИЯ	69

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире обострилась проблема использования и сохранения способности окружающей среды создавать постоянный поток ресурсов и услуг. Параллельно с этим явлением растет количество отходов, производимых предприятиями и населением всех стран мира. Большинство стран столкнулись с серьезными экономическими, социальными и экологическими проблемами, которые включают в себя дефицит и дороговизну ресурсов, перепотребление продукции, загрязнение, захламление и деградацию окружающей среды, отчуждение территорий и др. Чтобы справиться с экологическими и экономическими проблемами и обеспечить устойчивое развитие общества, правительства разных стран находятся в непрерывном поиске оптимальных механизмов управления, позволяющих не только обеспечить потребности нынешнего и будущих поколений потребителей в материальных благах, но и снизить затраты на производство указанных благ, предотвратить деградацию экосистем, снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду, а также повысить экологическую сознательность населения.

Обезвреживание и использование отходов производства и потребления является одним из приоритетных направлений государственной политики в области охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов и обеспечения экологической безопасности.

В Высшей школе технологии и энергетики в учебный план магистратуры по направлению «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» включена дисциплина «Технология обезвреживания и использования отходов», которая предусматривает изучение теоретического материала на лекциях, решение практических задач на практических занятиях и в рамках курсового проектирования.

Настоящее учебно-методическое пособие позволит выработать у студентов соответствующие компетенции, закрепить полученные знания и подготовить их к решению задач, столь значимых для государства в настоящее время.

1. ОБРАЩЕНИЕ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

1.1. Выбор направления обращения с отходами

Согласно законодательству Российской Федерации к *отходам* производства и потребления относят вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг, в процессе производственного или непроизводственного потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с Федеральным законом «Об отходах производства и потребления» [1].

При этом отходы производства и потребления идентифицируют в силу особенностей их образования, удаления или специфичности состава и свойств.

Группирование отходов в федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО) происходит на основании их происхождения, химического и/или компонентного состава, агрегатного состояния и физической формы.

ФККО имеет шесть уровней классификации отходов, расположенных по иерархическому принципу (в порядке убывания) и отражающих:

- происхождение отходов по исходному сырью и по принадлежности к определенному производству, технологическому процессу (блок, тип, подтип, группа);

- химический и (или) компонентный состав отходов (подгруппа);

- агрегатное состояние и физическая форма отходов (позиция).

В блоки включаются типы отходов, обобщенные по классификационному признаку происхождения: отходы органические природного происхождения (животного и растительного); отходы минерального происхождения; отходы химического происхождения; отходы коммунальные.

Классификация отходов по типам, подтипам, группам, подгруппам и позициям отражает развернутое описание происхождения и состава отходов, а также их агрегатное состояние и физическую форму.

Конкретные виды отходов представлены в ФККО по наименованиям, а их классификационные признаки и классы опасности – в кодифицированной форме по 11-значной системе. Для кодирования блоков, типов и подтипов используются первые три знака; группы – знаки с четвертого по шестой; подгруппы – знаки седьмой и восьмой. Девятый и десятый знаки кода используются для кодирования агрегатного состояния и физической формы вида отходов: 00 – данные не установлены; 01 – твердый; 02 – жидкий; 03 – пастообразный; 04 – шлам; 05 – гель, коллоид; 06 – эмульсия; 07 – суспензия; 08 – сыпучий; 09 – гранулят; 10 – порошкообразный; 11 – пылеобразный; 12 – волокно; 13 – готовое изделие, потерявшее потребительские свойства; 99 – иное. Одиннадцатый знак кода используется для кодирования класса опасности отходов [2, 3].

Поскольку отходы представляют собой комбинации веществ, для их идентификации установлено 5 классов опасности исходя из степени воздействия на окружающую среду. Традиционно воздействие отходов характеризуется степенью деградации и сроком восстановления экологических систем, в которые они были помещены или с которыми взаимодействовали (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Характеристики классов опасности отходов

Класс опасности отхода и его название	Характеристики воздействия отхода на окружающую среду
I – чрезвычайно опасные	Экологическая система необратимо нарушена. Период восстановления отсутствует
II – высокоопасные	Экологическая система сильно нарушена. Период восстановления не менее 30 лет после полного устранения источника вредного воздействия
III – умеренно опасные	Экологическая система нарушена. Период восстановления не менее 10 лет после снижения вредного воздействия от существующего источника
IV – малоопасные	Экологическая система нарушена. Период самовосстановления не менее 3 лет
V – практически неопасные	Экологическая система практически не нарушена. Период самовосстановления менее 3 лет или отсутствует

В законодательстве выделяют также особые группы отходов потребления: *твердые коммунальные отходы (ТКО)* – отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях, бытовых помещениях организаций и предприятий в целях удовлетворения личных и бытовых нужд; *отходы от использования товаров (ОИТ)* – отходы, образовавшиеся после утраты товарами, упаковкой товаров полностью или частично своих потребительских свойств. Причем вторая группа отходов может быть представлена как селективно собранными населением изделиями и материалами, избежавшими попадания в ТКО, так и отходами производственного потребления, образованными на предприятиях в результате распаковки сырья, упаковки продукции, выработки эксплуатационного ресурса оборудования, комплектующих, потери изделиями товарных свойств и т. п.

В свете современной экономико-экологической политики России, реализуемой в виде внедрения в стране принципов ресурсосбережения и цикличной экономики (экономики замкнутого цикла – ЭЗЦ), ТКО и ОИТ представляют особый интерес.

К базовым принципам ЭЗЦ относятся эффективное использование первичных ресурсов, максимальное вовлечение в хозяйственный оборот вторичных ресурсов, а также выявление и предотвращение негативных

воздействий на окружающую среду (НВОС) на протяжении всего жизненного цикла продукции.

Федеральным законодательством к *вторичным ресурсам* отнесены отходы, которые могут быть полностью или частично использованы для производства товаров, выполнения работ, оказания услуг (*вторичные материальные ресурсы – ВМР*) или получения энергии (*вторичные энергетические ресурсы – ВЭР*) и которые получены в результате отдельного накопления, сбора или обработки отходов либо образованы в процессе производства.

Поскольку из вторичных ресурсов могут быть получены как готовые к потреблению товары и изделия, так и *вторичное сырье* (продукция, которая может использоваться в производстве другой продукции и/или иной хозяйственной деятельности), можно утверждать, что отходы наравне с природными ресурсами сегодня являются ключевыми объектами рыночных отношений [1, 4, 5].

Порядок обращения с отходами и возможность их введения в существующий производственный процесс отчасти определяются их классификационными признаками, описанными в ФККО, отчасти – требованиями к производимой продукции. Под обращением с отходами понимают деятельность по их накоплению, сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и/или размещению.

Накопление отходов – складирование отходов на срок не более чем одиннадцать месяцев с целью их дальнейшей обработки, утилизации, обезвреживания и/или размещения.

Сбор отходов – прием отходов в целях их дальнейшей обработки, утилизации, обезвреживания, размещения [1].

Транспортирование отходов – перевозка отходов автомобильным, железнодорожным, воздушным, внутренним водным и морским транспортом в пределах территории России, в том числе по автомобильным дорогам и железнодорожным путям, осуществляемая вне границ земельного участка, находящегося в собственности индивидуального предпринимателя или юридического лица, либо предоставленного им на иных правах.

Обработка отходов – предварительная подготовка отходов к дальнейшей утилизации, включая их сортировку, разборку, очистку. Под обработкой отходов понимают проведение технологических операций, которые могут привести к изменению физического, химического или биологического состояния отходов для обеспечения возможности выполнения последующих работ по обращению с отходами [4].

Утилизация отходов – использование отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов, в том числе:

рециклинг – повторное применение отходов по прямому назначению;

регенерация – возврат отходов в производственный цикл после соответствующей подготовки;

рекуперация – извлечение полезных компонентов для их повторного применения;

энергетическая утилизация – использование ТКО в качестве вторичных энергетических ресурсов (сжигание, высокотемпературная обработка) после извлечения из них полезных компонентов на объектах обработки, соответствующих требованиям законодательства.

Причем организации и предприятия, в результате деятельности которых образовались вторичные ресурсы, обязаны обеспечить их утилизацию самостоятельно либо передать вторичные ресурсы другим лицам для утилизации.

Из определений видно, что понятие «*использование отходов*» является частью более общего понятия утилизации отходов.

Обезвреживание отходов – уменьшение массы отходов, изменение их состава, физических и химических свойств (в том числе сжигание и/или обеззараживание на специализированных установках) в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

Определение понятия «*переработка отходов*» в современном федеральном законодательстве отсутствует, однако употребляется в технической литературе и служит для обозначения комплекса технологических процессов по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов.

Размещение отходов – хранение и захоронение отходов:

- *хранение отходов* – складирование отходов в специализированных объектах сроком более чем одиннадцать месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения;

- *захоронение отходов* – изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую среду. Захоронение вторичных ресурсов не допускается [1].

Государственная политика в области обращения с отходами, как и частные подходы к выбору направлений обращения с ними, основаны на приоритетности направлений охраны окружающей среды, который представлен в виде блок-схемы на рисунке 1.1.

Вовлечение отходов во вторичный оборот на данный момент является актуальной экологической задачей. Одним из инструментов, побуждающих производителей утилизировать вторичные ресурсы и отходы от использования товаров, является концепция расширенной ответственности производителя (РОП).

В основе РОП лежит убеждение, что производитель или импортёр является стороной, которая способна оказать наибольшее влияние на снижение экологического воздействия упаковки или продукта, в том числе путем разработки и производства менее опасных для ОС и более перерабатываемых материалов.



Рис. 1.1. Приоритетные направления государственной политики в области управления отходами и вторичными ресурсами

Механизм РОП предполагает, что производитель и импортер товаров берет на себя ответственность за утилизацию продукции и упаковки, которую они произвели или ввезли, по завершении ее жизненного цикла (рис. 1.2).

Принцип РОП реализуется посредством административно-правовых (установление и применение законов и нормативно-правовых актов, определяющих цели, стандарты и технологии), экономических (применение системы депозитов, авансовых платежей и др.) и информационных инструментов (экологическая маркировка товаров, реклама и др.).

Установлены нормативы утилизации отходов от использования товаров и упаковки, исчисляемые в долях от количества произведенных или ввезенных в Россию товаров. Перечень содержит около полусотни групп товаров и упаковки: текстильные изделия и упаковка; деревянные и бумажные/картонные изделия; нефтепродукты; изделия из резины; изделия и упаковка из пластмасс; изделия и упаковка стеклянные; тара и упаковка из металлов; электронное и электробытовое оборудование; фильтры для двигателей внутреннего сгорания.

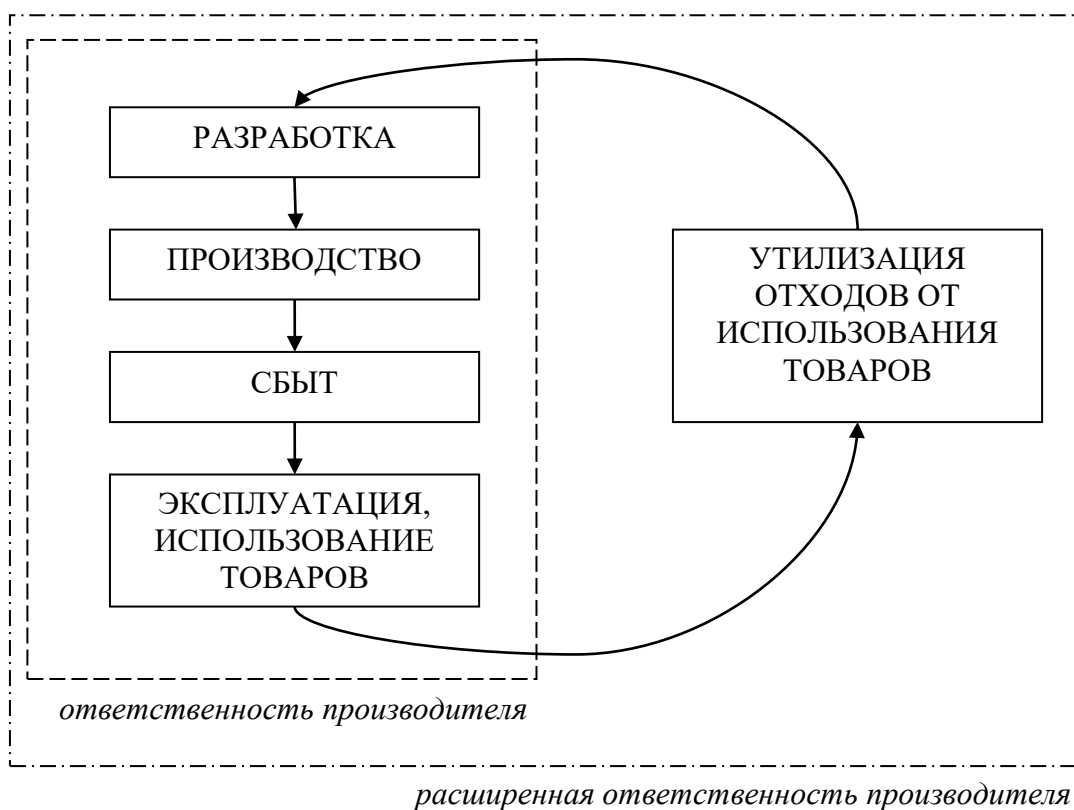


Рис. 1.2. Блок-схема РОП

Обеспечение выполнения нормативов утилизации осуществляется одним из четырех путей:

1) самостоятельная утилизация производителем или импортером товаров на собственных объектах инфраструктуры;

2) передача на утилизацию иному лицу по договору: оператору по обращению с ТКО, оператору по обращению с токсичными отходами, лицензированному предприятию, осуществляющему деятельность по утилизации отходов, и т. п.;

3) перепоручение выполнения нормативов утилизации ассоциации, созданной производителями товаров, импортерами товаров в целях обеспечения выполнения нормативов утилизации или публично-правовой компанией «Российский экологический оператор» (ОИТ ассоциации);

4) уплата экологического сбора.

Таким образом, РОП предполагает утилизацию отходов в части их рециклинга по замкнутой цепи (в тот же продукт) или по открытой цепи (в другой продукт).

Производители, импортеры товаров обязаны по итогам года представлять в Росприроднадзор отчетность о выполнении нормативов утилизации и декларацию о количестве выпущенных в обращение товаров, подлежащих утилизации, реализованных для внутреннего потребления на территории РФ, и расчет суммы экологического сбора. При этом выбор технологий утилизации остается за производителем [1].

1.2. Выбор технологии утилизации и обезвреживания

Как уже упоминалось ранее, вторичные ресурсы подлежат обязательной утилизации, и их захоронение не допускается. Причем даже физическим лицам, в процессе потребления которыми образуются вторичные ресурсы, настоятельно рекомендуется осуществлять раздельное накопление ОИТ, например, на площадках накопления ТКО, или передавать в места сбора вторичных ресурсов.

Для создания эффективной схемы утилизации отходов сбор вторичных ресурсов на дополнительных площадках и пунктах приема выведен из списка лицензируемых видов деятельности. Эта мера призвана обеспечить большую чистоту и утилизационную пригодность отходов за счет их селективного накопления и сбора и снизить затраты на переработку.

Складирование вторичных ресурсов при накоплении или сборе осуществляется по видам вторичных ресурсов или по группам однородных отходов. Требования по выбору и обоснованию применения определенных технологий обработки, утилизации или обезвреживания отходов производства и потребления также установлены в зависимости от:

- вида отходов;
- группы однородных отходов (в т. ч. ТКО и ОИТ);
- класса опасности отходов.

Перечень видов отходов, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается, установлен Распоряжением Правительства РФ от 25.07.2017 г. № 1589-р [6].

На 2023 год перечень включает 182 вида отходов:

- 177 видов отходов, включенных в блок 4 ФККО «Отходы потребления производственные и непроизводственные; материалы, изделия, утратившие потребительские свойства, не вошедшие в блоки 1 – 3, 6 – 9». Это преимущественно отходы различных металлов и сплавов и отходы электронного и электробытового оборудования; а также макулатура и изделия из бумаги; синтетические полимеры; стеклянная тара;

- 5 видов отходов, включенных в блок 9 ФККО «Отходы при выполнении прочих видов деятельности, не вошедшие в блоки 1 – 3, 6 – 8». Это отходы шин, камер и покрышек транспортных средств.

Часть перечисленных в распоряжении № 1589-р видов отходов могут быть отнесены к вторичным ресурсам, образованным в процессе производства, но большинство относятся к ресурсоценным отходам потребления с характерными общими признакам (условиям образования, химическим или морфологическим составом, физической формой и др.), т. е. образуют группы однородных отходов.

В приказе Минприроды РФ № 399 приведены требования при обращении с некоторыми группами однородных отходов, которые должны обеспечить реализацию приоритетных направлений государственной экологической политики в области обращения с отходами [7].

Особые требования по утилизации распространяются на следующие группы однородных отходов:

- отходы аккумуляторов и аккумуляторных батарей транспортных средств;
- батареи и аккумуляторы, утратившие потребительские свойства, кроме аккумуляторов для транспортных средств;
- отходы электролитов аккумуляторов и аккумуляторных батарей;
- минеральные и синтетические масла, утратившие потребительские свойства;
- оборудование компьютерное, электронное, оптическое, утратившее потребительские свойства;
- отходы шин, покрышек, камер.

Для реализации принципа ресурсосбережения при утилизации отходов электролитов аккумуляторов и аккумуляторных батарей, содержащих свинец, доля общей массы отходов, использованная для получения продукции, должна быть не менее 50 %. При утилизации отходов электролитов, содержащих никель, кадмий – не менее 75 %.

Запрещается обезвреживать отходы оборудования компьютерного, электронного и оптического путем их сжигания. Но разрешена их термическая утилизация с применением пирометаллургического или гидрометаллургического методов, позволяющих извлекать полезные компоненты из печатных плат (с последующей обязательной нейтрализацией всех отходящих газов и элементов).

Обработка отходов электронного оборудования перед их утилизацией является обязательной в случае, если они содержат драгоценные металлы, химические источники тока, детали, содержащие ртуть, свинец.

Также приказ Минприроды содержит индивидуальные приоритетные подходы для некоторых групп однородных отходов. Например, способы утилизации отходов шин, покрышек и камер являются приоритетными в следующей последовательности:

- 1) утилизация отходов шин в качестве вторичного материального ресурса без применения термических методов;
- 2) утилизация отходов шин с применением термических методов с получением продукции.

При утилизации отходов шин доля общей массы отходов, поступивших на утилизацию, фактически использованная для получения продукции, должна составлять не менее 90 %.

Поскольку технологии переработки указанных групп отходов хорошо изучены, а оборудование доступно, хранение отходов до их утилизации или обезвреживания ограничено 36 месяцами [2, 6, 7].

Наилучшие доступные технологии утилизации или обезвреживания типовых видов и групп однородных отходов описаны в ИТС 9-2020 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами» и ИТС 15-2021 «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания

термическим способом (сжигание отходов)». При выборе оптимального направления обращения и/или технологии можно воспользоваться «Банком данных об отходах и о технологиях использования и обезвреживания отходов различных видов» или разработать и внедрить индивидуальные технические решения. При принятии решений важно учитывать, что на осуществление обработки, утилизации и обезвреживания отходов I – IV классов опасности необходимо иметь лицензию.

Обращение с отходами I и II классов опасности имеет свою специфику. Природопользователи, в результате деятельности которых образуются чрезвычайно опасные и высокоопасные отходы, могут осуществлять их утилизацию и обезвреживание самостоятельно, если располагают соответствующими лицензированными объектами. Однако, если таких объектов в составе предприятия нет, отходы должны быть переданы федеральному оператору, который осуществляет обращение с ними в соответствии с федеральной схемой обращения. Для выбора технологии их утилизации или обезвреживания могут быть использованы рекомендации ИТС 52-2022 «Обращение с отходами I и II классов опасности» [1, 8 – 10].

2. УТИЛИЗАЦИЯ И ЛИКВИДАЦИЯ ОТХОДОВ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

2.1. Отходы синтетических полимеров

Синтетические полимеры (пластмассы) представляют собой обширную группу высокомолекулярных соединений, которые искусственно синтезируются в результате прохождения химических реакций полимеризации.

В зависимости от характера превращений, происходящих с полимером при формовании изделий, пластмассы разделяют на термореактивные (реактопласты, рис. 2.1.) и термопластичные (термопласты, рис. 2.2). Переработка реактопластов в изделия сопровождается необратимой химической реакцией, приводящей к образованию неплавкого и нерастворимого материала (так называемые сшитые полимеры). Термопласты после формования изделий сохраняют способность к повторной переработке.

Производство и потребление реактопластов несоизмеримо мало по сравнению с производством и потреблением термопластов, поэтому в настоящем разделе будет содержаться информация, применимая преимущественно к термопластичным полимерам и их отходам.

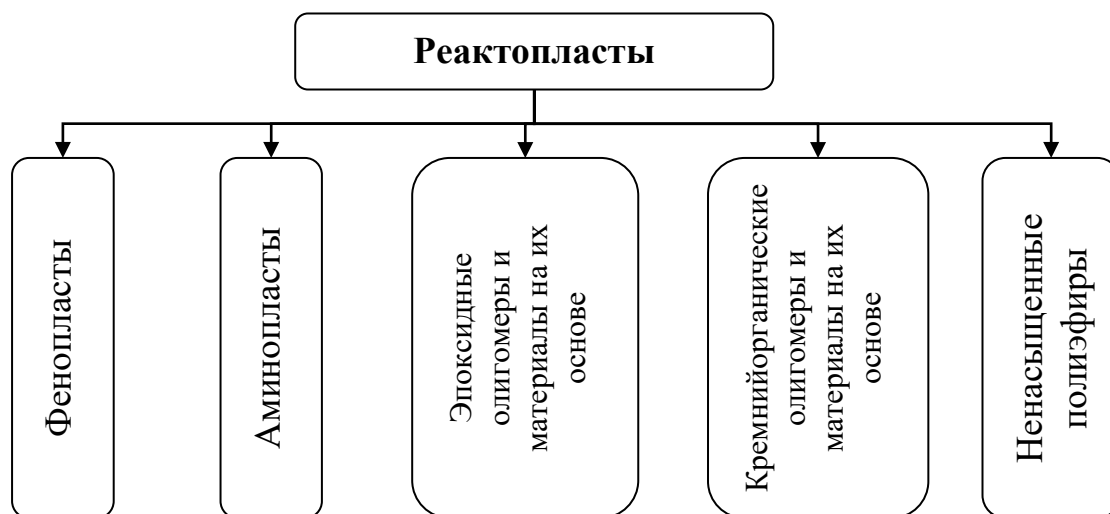


Рис. 2.1. Основные группы реактопластов



Рис. 2.2. Основные группы и виды термопластов

Все отходы синтетических полимеров могут быть разделены по источникам образования на три группы:

- отходы производства;
- отходы производственного потребления;
- отходы непромышленного потребления.

К первой группе относятся отходы, образующиеся в результате выбраковки материалов и изделий, их обработки, зачистки оборудования и других производственных процессов. Ко второй – отходы доставки, распаковки, упаковки сырья, материалов и продукции.

К третьей группе относятся изделия из синтетических полимеров однократного применения (например, упаковка) и длительного применения (предметы домашнего обихода, инвентарь, элементы техники и оборудования, отделочные материалы и др.), образующиеся в результате бытового потребления [11].

Товары и упаковка из пластмасс входят в перечень товаров, подлежащих утилизации после утраты ими потребительских свойств. Но наибольший



интерес с точки зрения охраны окружающей среды представляют отходы производственного и непроизводственного потребления пластмасс.

Поскольку подходы к обращению с отходами пластмасс определяются целым комплексом качеств полимера (физическая форма, состав, свойства, доступность технологических решений и др.), идентификация отхода является важной стадией процесса. Некоторые ключевые факторы первичной идентификации отходов наиболее распространенных термопластов приведены в таблицах 2.1 и 2.2.


Таблица 2.1 – Факторы идентификации отходов производства термопластов

Примеры источников образования отходов	Загрязненность	Вид и физическая форма	Примеры идентификации по ФККО
Технологические отходы, образующиеся при производстве пластмасс: корки, образующиеся на стенках реакторов и фильтров; некондиционные полимеры; образцы пластмасс после физико-химических испытаний	однородные; незагрязненные или малозагрязненные	твердые сыпучие материалы (порошок, гранулят, агломерат)	отходы грануляции полиэтилена в его производстве (IV класс опасности); просьпы полипропилена и полиэтилена в производстве изделий из них (IV класс опасности); отходы зачистки сепараторов в производстве полиэтилена низкого давления (III класс опасности); отходы преобразованного поливинилхлорида при технических испытаниях поливинилхлорида (III класс опасности)
Технологические отходы, образующиеся при переработке и отработке пластмасс: литниковые отходы, брак, обрезки		твердые отходы (куски стружка); изделия из твердых материалов	отходы пленки на основе полиэтилентерефталата при ее матировании (III класс опасности); отходы полистирола при очистке сточных вод производства вспенивающегося полистирола (IV класс опасности); брак поливинилхлорида (III класс опасности); отходы шлифования изделий из термопластов в их производстве полистирола (IV класс опасности)

Таблица 2.2 – Факторы идентификации отходов потребления термопластов

Группа	Загрязненность	Основной термопласт	Маркировка изделия*	Примеры идентификации по ФККО	Примечание
Отходы производственного потребления	загрязненные, содержат однородные примеси	ПЭТ		обрезки ленты полиэстеровой, утратившей потребительские свойства (IV класс опасности)	упаковочная лента
		ПЭНД		тара полиэтиленовая, загрязненная лакокрасочными материалами (содержание 5% и более) (III класс опасности); упаковка полиэтиленовая, загрязненная ванадиевым катализатором (IV класс опасности)	бутылки, бочки, ящики

Группа	Загрязненность	Основной термопласт	Маркировка изделия*	Примеры идентификации по ФККО	Примечание
Отходы производственного потребления	загрязненные, содержат однородные примеси	ПВХ		провод медный в изоляции из поливинилхлорида, утративший потребительские свойства (III класс опасности); отходы ткани баннерной с наполнителем из поливинилхлорида (III класс опасности)	-
		ПЭВД		упаковка полиэтиленовая, загрязненная сырьем для производства гербицидов 2, 3 классов опасности (содержание гербицидов 2% и более) (III класс опасности); упаковка полиэтиленовая, загрязненная пищевыми продуктами (IV класс опасности)	-
		ПП		упаковка полипропиленовая, загрязненная реагентами для производства целлюлозы (IV класс опасности); отходы металлизированного полипропилена в виде пленки незагрязненные (IV класс опасности); отходы шпагата и ленты полипропиленовые, утратившие потребительские свойства (IV класс опасности)	мешки, биг-бэги, паллеты; обертки для пищевой продукции; клейкая лента и этикетки
		ПС		упаковка из полистирола, загрязненная поверхностно-активными веществами (IV класс опасности); отходы пенопласта на основе полистирола незагрязненные (V класс опасности);	упаковка для защиты от повреждений
Отходы непроизводственного потребления	значительно загрязненные, содержат разнородные примеси	ПЭТ		лом и отходы изделий из полиэтилентерефталата незагрязненные (V класс опасности); отходы упаковки из полиэтилентерефталата, извлеченные при сортировке твердых коммунальных отходов (IV класс опасности)	ПЭТ-бутылки для напитков
		ПЭНД		тара полиэтиленовая, загрязненная средствами моющими, чистящими и полирующими (IV класс опасности)	бутылки для отбеливателей, кондиционеров и др.
		ПВХ		отходы поливинилхлорида в виде изделий или лома изделий незагрязненные (IV класс опасности)	водосточные трубы, облицовочные панели, фитинги
		ПЭВД		отходы пленки полиэтилена и изделий из нее незагрязненные (V класс опасности); отходы пленки полиэтиленовой, извлеченные при сортировке твердых коммунальных отходов (IV класс опасности)	потребительские пакеты
		ПП		отходы посуды одноразовой из разнородных полимерных материалов, загрязненной пищевыми продуктами (IV класс опасности); щетки моечных машин полипропиленовые, загрязненные нефтепродуктами (содержание нефтепродуктов менее 15%) (IV класс опасности)	одноразовые тарелки, стаканы, ложки, палочки для перемешивания напитков

Группа	Загрязненность	Основной термопласт	Маркировка изделия*	Примеры идентификации по ФККО	Примечание
Отходы непроизводственного потребления	значительно загрязненные, содержат разнородные примеси	ПС		упаковка из полистирола, загрязненная веществами органического природного происхождения IV класс опасности)	упаковка и вкладыши в упаковку для яиц, овощей, деликатесных нарезок, готовых блюд при их доставке на дом из кафе и ресторанов

* Маркировка приведена в соответствии с нормативной документацией [12, 13].

Согласно результатам исследования рынка производства пластмасс более 50 % производимых термопластов составляют полиэтилен (ПЭ) и полиэтилентерефталат [9]. Как видно из таблицы 2.2, большая часть отходов ПЭ и ПЭТ непроизводственного потребления относится к товарам одноразового использования, и свойства материала в процессе эксплуатации не успевают значительно снизиться, что делает указанные полимеры потенциально ценными вторичными ресурсами.

Процедуры отдельного накопления и сбора полимерных отходов необходимы, если производственной задачей является утилизация мономеров или других исходных продуктов. Однако современные производители в качестве упаковочного материала с хорошими барьерными свойствами часто используют многослойные плёнки и тару из комбинированных материалов, которая после использования содержит органические и неорганические загрязнители.

В ряде случаев отход представляет собой механическую смесь различных термопластов. Большинство термопластов термодинамически несовместимы или ограниченно совместимы (не более 10 % примесей в основном полимере). Они не образуют гомогенные расплавы, что отрицательно сказывается на механических свойствах продукции из вторичных полимеров. Идентификация и сепарация пластмасс могут быть выполнены ручным или механизированным способами. Стадия обработки нередко включает этапы удаления черных и цветных металлов, абразивных примесей; мойку и измельчение или агломерацию отхода, которые предшествуют разделению полимерной смеси (табл. 2.3.).

Таблица 2.3 – Механизированные методы разделения термопластов

Метод	Характеристика метода
Флотационное разделение	разделение измельченных отходов в водных растворах ПАВ различной плотности в зависимости от свойств материалов (гидрофобных и гидрофильных)
Воздушное разделение	разделение измельчённых отходов в воздушных сепараторах за счёт разности в плотности и объёмной массе

Метод	Характеристика метода
Жидкостно-циклонное разделение	смесь измельчённых отходов вместе с водой поступает в систему циклонов, где за счет центробежных сил происходит последовательное разделение полимеров по плотности
Электростатическое разделение	смесь измельчённых отходов подаётся в электростатические сепараторы, где по разности диэлектрических характеристик отходов полимеров происходит их разделение
Разделение методом растворения	смесь измельчённых отходов растворяют в различных растворителях. После фильтрации и испарения растворителей выделяются соответствующие полимеры
Разделение методом спектроскопии (ультракороткими и гамма-лучами)	смесь тонкоизмельченных отходов полимеров разделяется по цвету при прохождении отходов по скоростному конвейеру. ИК-спектр в ближней области содержит информацию о молекулярных колебаниях, поглощающих световую энергию

Эффективность отделения полиолефинов (ПЭ и ПП) от прочих термопластов при применении методов, приведенных в таблице 2.3, обычно превышает 96 %.

2.2. Утилизация отходов синтетических полимеров

Технологии утилизации полимерных отходов могут быть разделены на два класса:

- 1) утилизация для получения вторичного полимерного сырья (деструктивная и недеструктивная);
- 2) ликвидация отходов для получения вторичных энергетических ресурсов (энергетическая ликвидация) с образованием пара, тепловой или электрической энергии.

Методы утилизации термопластов делятся на три группы: механические, химические и биологические. Механические методы и метод химической модификации относятся к недеструктивным, поскольку в процессе утилизации структура полимерных молекул не претерпевает значительных изменений. Прочие химические, а также биологические методы направлены на деградацию макромолекул до мономеров и простых веществ.

Наиболее широкое распространение получили механические методы переработки. Около 70 % от общей массы перерабатываемых термопластов утилизируются механическими методами.

Основные методы механической утилизации термопластов:

- каландрирование;
- литье под давлением;
- термопрессование;
- ротационное формование;
- экструзия;
- интрузия и др.

Каландрирование – это метод непрерывной переработки полимерного материала при пропускании его расплава через зазор между вращающимися валками каландра. При каландрировании расплав полимерного материала проходит через каждый зазор только один раз. При этом происходит увеличение ширины ленты материала при одновременном ее утончении. В результате каландрирования получают полотно заданной толщины и ширины.

Литье под давлением – метод переработки полимерных материалов, заключающийся в их нагревании до вязкотекучего состояния и продавливании его в закрытую литьевую форму, где материал приобретает конфигурацию внутренней полости формы и затвердевает. Для осуществления литья под давлением применяют плунжерные или шнековые литьевые машины, на которых устанавливают литьевые формы различной конструкции.

Термопрессование – это метод переработки полимерных материалов, заключается в пластической деформации материала при действии на него повышенной температуры и давления и последующей фиксации формы изделия путем охлаждения под давлением. Методом прессования получают плиточные изделия, листы, блоки и изделия сложной формы. Прессование является одним из старейших методов переработки термопластов, но его применение ограничено низкой производительностью – в десятки раз ниже, чем при литье под давлением.

Ротационное формование применяется для переработки тонкоизмельченных (порошковых) термопластов. Метод заключается в помещении материала в холодную форму (полую раковинообразную конструкцию) и последующем нагреве и охлаждении формы при ее непрерывном вращении относительно двух осей. Охлаждение формы осуществляется с помощью холодного воздуха или водяного тумана. Путем ротационного формования получают полые изделия разнообразных форм и размеров.

Перечисленные методы применимы для первичных термопластов и чистых однородных отходов, например, для отходов производства и обработанных отходов производственного потребления.

Наиболее часто для утилизации отходов термопластов применяется метод экструзии в качестве первой или единственной ступени переработки.

Экструзия – метод переработки полимерных материалов, заключающийся в продавливании высоковязкого материала на основе расплава, через формующий инструмент (формующую головку, фильеру), с целью получения изделия необходимого профиля.

Интрузия является комбинированным методом, в котором совмещены процессы экструзии и литья под давлением. Полость литьевой формы постепенно заполняется расплавом термопласта под давлением, нагнетаемым экструдером. При интрузии расплав подается в форму вращающимся шнеком до заполнения ее на 70–80 %, а затем оставшаяся часть расплава впрыскивается в форму за счет поступательного движения шнека.

Также к новым перспективным методам утилизации отходов термопластов относятся твердофазные разновидности перечисленных выше методов (объемное и листовое формование, твердофазная и гидростатическая экструзия, твердофазная поликонденсация и др.). Формование полимеров ведется в твердом агрегатном состоянии в температурном интервале, заключенном между комнатной температурой и температурой стеклования для аморфных полимеров (ПС, ПК, АБС и др.) или плавления для кристаллизующихся полимеров (ПЭ, ПП, ПЭТ и др.).

В результате механической утилизации отходов термопластов получают изделия производственно-технического и бытового назначения: упаковочные материалы, детали бытовой техники, строительные и отделочные материалы и др. (рис. 2.3).

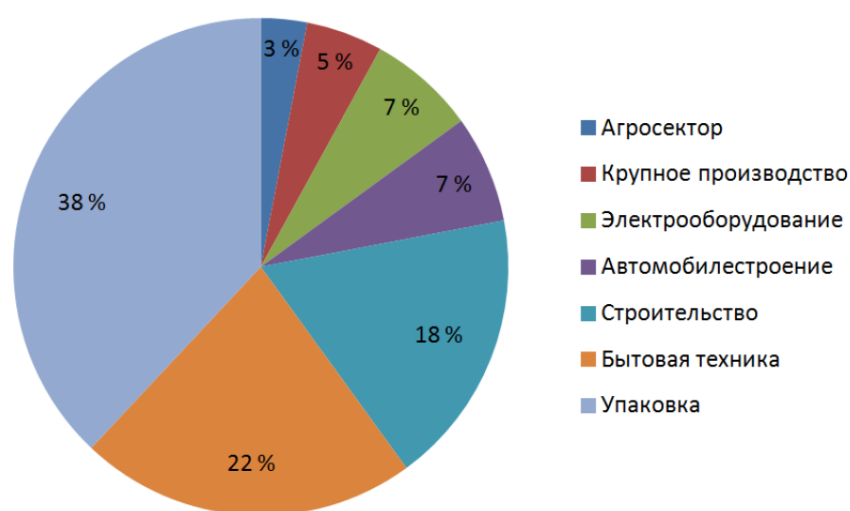


Рис. 2.3. Структура применения вторичного сырья, полученного из отходов синтетических полимеров [9]

Большинство синтетических полимеров устойчивы к биоразложению. Устойчивость к биodeградации зависит от вида термопласта и от степени кристаллизации его молекул. Биологическая деструкция термопластов осуществляется с использованием специально культивированных штаммов бактерий и грибов. Согласно исследованиям, к разложению ПЭ способны лигнолитические микроорганизмы, продуцирующие ферменты, расщепляющие фенолсодержащие звенья лигнина, а также алифатические углеводороды. ПЭТ подвержен деструкции под воздействием микроорганизмов, продуцирующих полиэстераз, и карбоксиэстераз [14, 15].

Химические методы утилизации термопластов можно условно разделить на две группы: химическую модификацию и химическую деструкцию.

Химическая модификация направлена на повышение термодинамической совместимости полимеров и реализуется путем введения связующих добавок (компатибилизаторов) или путем образования в расплаве полимеров свободных радикалов. Применяются компатибилизаторы на основе блок- и привитых

сополимеров (малеинового ангидрида, акриловой кислоты и др.) или нанонаполнителей. Появление в расплаве свободных радикалов провоцируют путем введения пероксидов или физической обработкой смеси радиационным излучением [16, 17].

Химическая деструкция заключается в конверсии полимеров до мономеров или иных ценных веществ. К основным методам химической деструкции термопластов относится сольволиз.

Понятие сольволиз объединяет различные способы химической деполимеризации (метанолиз, гидролиз, гликолиз, ацидолиз, омыление и др.), в ходе которых отходы взаимодействуют с метанолом, кислотами, этиленгликолем, органическими соединениями, щелочами и др., с получением низкомолекулярных продуктов.

К химическим методам деполимеризации термопластов специалисты иногда относят и термохимические:

- пиролиз (термический крекинг);
- каталитический крекинг;
- газификация.

Ликвидация полимерных отходов для получения вторичных энергетических ресурсов может быть идентифицирована как энергетическая утилизация (если данный отход входит в состав хвостов сортировки ТКО) или как обезвреживание. Термическая ликвидация термопластов заключается в их прямом сжигании.

Термопласты по своей природе являются углеводородами и характеризуются высокой калорийностью, сопоставимой с калорийностью мазута. Для оптимизации утилизации отходов термопластов в энергетических целях разница между выделенной при их сжигании энергией (низшая теплота сгорания) и необходимой энергией была положительной (коэффициент термического усиления) (табл. 2.4). Однако при сжигании отходов термопластов необходимо учитывать, что в результате термоокислительной деструкции самих полимеров, добавок и примесей, содержащихся в них, образуются высокотоксичные соединения в концентрациях, опасных для здоровья человека и окружающей среды. Наиболее опасными специфическими компонентами дымовых газов являются полиароматические углеводороды, диоксины, неорганические соединения хлора, цианистые соединения и др. Токсичные соединения содержит и донная зола от сжигания термопластов.

Таблица 2.4 – Низшая теплота сгорания и значения коэффициентов термического усиления некоторых термопластов [18]

Наименование материала	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Коэффициент термического усиления, МДж/кг
Полиэтилен	43,0	22,0
Полипропилен	44,0	23,6
Полиэтилентерефталат	22,0	12,0
Полистирол	40,0	21,8

Наименование материала	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Коэффициент термического усиления, МДж/кг
Поливинилхлорид	17,0	9,0
Поликарбонат	29,0	15,0

Для сжигания отходов термопластов используются мусоросжигательные котлы (печи) подовой и ротационной (барабанной) конструкций, печи с кипящим (взвешенным) слоем. Установки комплектуются системами комплексной очистки дымовых газов.

Для утилизации и обезвреживания полимерных отходов требуются надежный автоматизированный контроль технологического процесса и комплексный производственный контроль. Эти процедуры должны включать в себя разработку специальных инструкций по эксплуатации и технических условий, относящихся к полимерным отходам, подвергаемым утилизации, включая, при необходимости, правила оценки соответствия [11].

2.3. Выбор и расчет основного оборудования для утилизации полиолефинов методом экструзии

В общем случае схема утилизации загрязненных отходов полиолефинов включает следующие стадии:

- 1) предварительная очистка и классификация;
- 2) дробление;
- 3) промывка;
- 4) обезвоживание и сушка;
- 5) экструзия с одновременным введением добавок;
- 6) формование изделий;
- 7) охлаждение изделий.

Основным оборудованием для утилизации термопластов методом экструзии являются шнековые (червячные) экструдеры. В экструдер подается очищенный и измельченный полимерный материал влажностью не более 0,2 %. При переработке «гидрофильных» полимеров с большей влажностью используются шнеки с функцией дегазации.

Экструдер может быть одношнековым и многошнековым (мультишнековым) производительностью от 3 до 20000 кг/ч. Также существуют дисковые и поршневые экструзионные машины.

Одним из ключевых конструктивных параметров экструдера является соотношение осевой длины шнека (зоны нарезки) и его диаметра (L/D). Соотношение длины и диаметра варьируется в диапазоне от 15 до 40 в зависимости от типа экструдера и вида перерабатываемого материала. От длины шнека зависит, прежде всего, смесительный эффект, эффективность пластикации и гомогенизации, чем длиннее шнек, тем смесительный эффект

лучше, но ниже надежность и срок службы. В коротких экструдерах с соотношением длины и диаметра от 24:1 до 26:1 выделяют три–четыре зоны регулирования температур. В длинных экструдерах (L/D от 30:1 до 32:1) предусмотрено более пяти температурных зон.

Одношнековые экструдеры, которые нашли наиболее широкое применение в утилизации пластмасс, как правило, имеют шнеки с постоянным диаметром, т. е. диаметр шнека одинаков в его начале и конце.

На рисунке 2.4 приведена схема одношнекового экструдера.

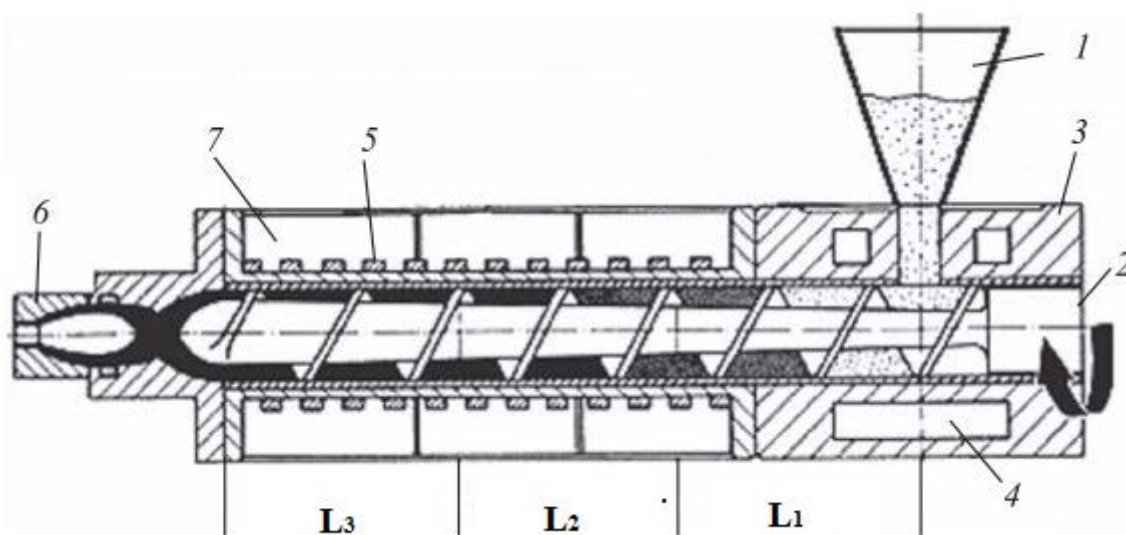


Рис. 2.4. Конструкция одношнекового экструдера: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – материальный цилиндр; 4 – полость для циркуляции воды; 5 – нагреватели; 6 – измерительная головка; 7 – каналы охлаждения

Зона питания L_1 – это участок, на котором подготовленные полимерные отходы, находясь в твердом состоянии, транспортируются и частично перемешиваются. Зона питания условно делится на зону загрузки и зону транспортирования. При трении материала о стенки температура уплотненной полимерной массы в этой зоне может подняться выше допустимого значения, в этом случае начнется преждевременное плавление полимера, что является нежелательным явлением, поскольку под воронкой бункера может возникнуть пробка и поступление материала в экструдер будет ограничено. Поэтому в зоне питания применяется охлаждение путем пропускания теплоносителя (воды) по водяной рубашке материального цилиндра экструдера. В процессе уплотнения сырья, в пространстве между витками шнека, воздух вытесняется и выходит обратно через бункер. Если воздух выйдет не полностью, в готовом продукте возникнут нежелательные полости.

Зона сжатия L_2 (или зона плавления/пластикации) – участок, на котором происходит плавление материала.

Зона дозирования L_3 (или зона нагнетания) – участок, на котором материал находится в расплавленном вязкотекучем состоянии, в этой зоне

создается давление, обеспечивающее продавливание расплава через формирующий инструмент. Давление в экструдере колеблется от 15 МПа до 100 МПа.

Из зоны нагнетания расплав полимера подается к обогреваемой измерительной головке, которая оснащена датчиками температуры и давления, а также решеткой для первичной фильтрации расплава.

К основным технологическим параметрам экструдера принято относить характеристики шнека, которым он оснащен: длина шнека (и его зон); диаметр; показатель отношения длины шнека к его диаметру; скорость вращения; профиль шнека (который описывается рядом параметров: глубина канала по зонам, шаг и направление винтовой нарезки, ширина канала, коэффициент сжатия и др.).

Терморегулирование по длине экструдера имеет особое значение, поскольку влияет и на качество переработки, и на энергоэффективность установки. Для ориентировочной оценки энергопотребления экструдера может быть использовано уравнение теплового баланса.

Главной характеристикой формирующего инструмента, который включает в себя формирующую головку и калибрующий узел, является гидравлическое сопротивление фильеры течению расплава полимера.

Для определения диаметра шнека рассчитывается соотношение объемного расхода расплава полимера и градиента скорости его сдвига:

$$\frac{V_3}{\gamma_3} = \frac{G_m}{\rho_{пл} \cdot \gamma_3}, \text{ м}^3,$$

где V_3 – объемная производительность экструдера, $\text{м}^3/\text{с}$;

γ_3 – градиент скорости сдвига массы в экструдере, с^{-1} . Значение среднего градиента скорости сдвига определяется исходя из характеристик перерабатываемого полимера и вида производимых изделий экспериментально, расчетными методами или принимается по справочным данным;

G_m – требуемая массовая производительность экструдера, $\text{кг}/\text{с}$. Массовая производительность может быть задана на основе данных о количестве поступающих на утилизацию отходов и режиме работы установки;

$\rho_{пл}$ – плотность полимерной массы (полимерной смеси), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Ориентировочный диаметр шнека определяется по номограмме сдвига полимерной массы (Приложение 1). После чего из каталога (Приложение 2) выбирается одношнековый экструдер с подходящими геометрическими характеристиками.

По значению соотношения осевой длины шнека и стандартного диаметра (L_3/D_3) рассчитывается длина шнека.

Длина зоны питания:

$$L_1 = n_1 \cdot t, \text{ м},$$

где n_1 – количество витков в зоне питания. Для стандартных одношнековых экструдеров при расчетах можно принимать значение $n_1 = 4 - 6$;

t – шаг нарезки витка шнека, м. Шаг нарезки определяется как расстояние между двумя последовательными витками и чаще всего принимается постоянным и равным диаметру шнека: $t = D_3$ (рис. 2.5).

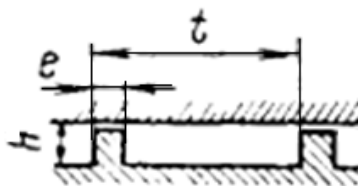


Рис. 2.5. Характеристики винтовой нарезки шнека: t – шаг нарезки витка шнека; e – ширина гребня витка шнека; h – глубина нарезки шнека (канала)

Для шнеков, предназначенных для переработки полиолефинов, зона дозирования составляет почти половину от общей длины шнека. Длина зоны дозирования определяется по количеству витков и имеет дополнительную ступень (зону сжатия) протяженностью в 1 виток.

$$L_3 = t \cdot (n_2 + 1), \text{ м,}$$

где n_2 – количество витков в зоне дозирования.

Длина зоны сжатия определяется по формуле:

$$L_2 = L_3 - (L_1 + L_3), \text{ м.}$$

Ширина гребня витка определяется по формуле:

$$e = a_3 \cdot D_3, \text{ м,}$$

где a_3 – коэффициент пропорциональности ширины витка. Коэффициент изменяется в диапазоне $a = 0,06 - 0,1$.

Глубина нарезки шнека (канала) в зоне дозирования определяется по формуле:

$$h_3 = 1,82 \left(\frac{v_3}{\gamma_3 \cdot D_3} \right)^{0,5}, \text{ м.}$$

Глубина нарезки шнека в зоне питания определяется по справочным данным и зависит от глубины канала в зоне дозирования.

Число заходов нарезки $z = 1$.

Рабочая скорость (частота) вращения шнека в зоне дозирования:

$$\omega_3 = \frac{\gamma_3 \cdot h_3}{\pi \cdot D_3}, \text{ об/с.}$$

Частота вращения шнека пересчитывается на обороты в минуту для проверки значения по каталогу.

Шаг нарезки витка связан с углом подъема винтовой линии шнека, который представляет собой угол между стенкой гребня винта шнека и плоскостью, перпендикулярной оси шнека. Математически эта зависимость выражается следующим образом:

$$\tan \varphi = \frac{t}{\pi \cdot D_3}.$$

Для выполнения теплового расчета экструдера задается температурный режим переработки. Для гомогенизации термопластов рабочая температура

варьируется в интервале между температурой текучести и температурой начала разложения: чем этот интервал меньше, тем труднее переработать материал в изделия – необходимо более точное регулирование температуры расплава и уменьшение времени нахождения материала при температуре выше температуры текучести. Температуру в одной или двух последних температурных зонах материального цилиндра задают на 5–10 °С ниже требуемой температуры расплава на выходе (табл. 2.5). Подбор значений температуры в остальных зонах зависит от теплофизических особенностей перерабатываемого полимерного отхода и от выбранной конструкции шнека.

Таблица 2.5 – Температурный режим переработки некоторых полиолефинов в экструдере

Синтетический полимер	Вид изделия	Температура, °С	
		расплава	формирующей головки
ПЭНП	листы	160 – 220	160 – 230
ПЭВП	профили	170 – 210	180 – 230
ПП	листы	180 – 250	190 – 260

Тепловой расчет экструдера сводится к расчету мощности нагревателей материального цилиндра экструдера, которая выражается из уравнения теплового баланса:

$$Q_H + Q_N + Q_M = Q_G + Q_{\Pi} + Q_{\text{охл}}, \text{ Вт},$$

где Q_H – мощность нагревателей материального цилиндра экструдера, кВт;

Q_N – тепловая мощность, выделяемая при потреблении механической мощности привода шнека, кВт;

Q_M – тепловая мощность, передаваемая цилиндру экструдера от материала, кВт;

Q_G – тепловая мощность, расходуемая на нагрев полимерного материала, кВт;

Q_{Π} – тепловая мощность, расходуемая на потери через боковую поверхность цилиндра экструдера, кВт;

$Q_{\text{охл}}$ – тепловая мощность, расходуемая на охлаждение шнека и зоны загрузки материального цилиндра, кВт.

Интенсивность выделяемой теплоты зависит от конструкции шнека, степени его износа, от давления и вязкости расплава полимера, от частоты вращения шнека. Ориентировочную тепловую мощность можно оценить по формуле:

$$Q_N = N_{\text{ср}} \cdot \eta_N, \text{ кВт},$$

где $N_{\text{ср}}$ – средняя электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети, кВт;

η_N – коэффициент полезного действия электродвигателя. Среднее значение КПД двигателя 0,8–0,85.

Тепловая мощность, передаваемая цилиндру экструдера от материала, рассчитывается по формуле:

$$Q_M = \frac{32 \cdot 10^{-5} \cdot G_m \cdot (T_3 - T_1)}{1000}, \text{ кВт},$$

где T_1 – температура полимерной смеси в зоне питания, К;

T_3 – температура полимерной смеси на выходе из зоны дозирования, К.

Тепловая мощность, расходуемая на нагрев полимерного материала

$$Q_G = \frac{G_m \cdot C_m \cdot (T_3 - T_1)}{3600}, \text{ кВт},$$

где C_m – теплоемкость полимерной смеси, кДж/кг·град.

Тепловая мощность, расходуемая на потери через боковую поверхность цилиндра экструдера

$$Q_{\Pi} = \frac{F_3 \cdot \alpha \cdot (T_K - T_B)}{1000}, \text{ кВт},$$

где F_3 – площадь наружной теплоотдающей поверхности в зоне материального цилиндра экструдера, м²;

α – коэффициент теплоотдачи материала наружной теплоотдающей поверхности в зоне материального цилиндра экструдера, кВт/м²·град;

T_K – температура наружной теплоотдающей поверхности, °С;

T_B – температура окружающей среды (воздуха), °С.

Тепловая мощность, расходуемая на охлаждение шнека и зоны загрузки материального цилиндра

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{ж}} \cdot C_{\text{ж}} \cdot \Delta T_{\text{ж}}, \text{ кВт},$$

где $C_{\text{ж}}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/кг·град;

$\Delta T_{\text{ж}}$ – перепад температуры воды на входе и выходе из зоны охлаждения, °С. Перепад температур обычно составляет 7–20 °С;

$G_{\text{ж}}$ – количество протекающей охлаждающей жидкости (воды), кг/с.

Гидравлическое сопротивление формующей головки зависит от количества формующих каналов и их конфигурации:

$$\Delta P_{\phi} = \sum_{i=1}^n \Delta P_i, \text{ Па},$$

где i – количеством каналов (отверстий для расплава).

Исходя из допущения, что движение материала в формующей головке ламинарное, можно рассчитать гидравлическое сопротивление одного канала по формуле:

$$\Delta P_i = \frac{\mu_{\text{эф}i} \cdot V_{\phi}}{k_i}, \text{ Па},$$

где $\mu_{\text{эф}i}$ – эффективная вязкость расплава, Па·с;

V_{ϕ} – объемный расход расплава через рассматриваемую модель канала формующей головки, м³/с;

k_i – частный коэффициент сопротивления участка канала простой геометрической формы, m^3 .

Эффективная вязкость расплава определяется по формуле:

$$\mu_{\text{эф}i} = \mu_i (\gamma_{\phi})^{m-1}, \text{ Па}\cdot\text{с},$$

где μ_i – вязкость расплава при заданной температуре формующей головки, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

γ_{ϕ} – скорость сдвига в формующей головке, с^{-1} ;

m – коэффициент пересчета при заданной температуре формующей головки.

Расход расплава через фильеру определяется исходя из производительности экструдера и плотности расплава.

Для расчета остальных параметров задаются типом фильеры и формой канала по каталогу (Приложение 3) [19 – 21].

3. УТИЛИЗАЦИЯ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ МАСЕЛ

3.1. Отходы автомобильных масел

Нефтепродукты применяют в промышленности и быту для смазки механизмов и в качестве рабочих жидкостей в различных гидросистемах, в электроэнергетике для изоляции и охлаждения электросилового оборудования.

К отработанным нефтепродуктам относят нефтепродукты, утратившие в процессе эксплуатации товарные свойства, в том числе масла, смеси нефти и нефтепродуктов. Отработанные нефтепродукты подлежат замене или удалению, в результате чего образуются отходы.

Отработанные нефтепродукты входят в число наиболее вредных химических загрязнителей окружающей среды, имеют класс опасности не ниже III. Наличие 2 г нефти и нефтепродуктов в 1 кг почвы делают ее непригодной для растений и почвенной микрофлоры; 1 л нефти и нефтепродуктов лишает кислорода 40 тыс. л воды; 1 т нефти и нефтепродуктов загрязняет 12 км² водной поверхности. Действие нефтепродуктов на водную фауну происходит в нескольких направлениях:

- поверхностная пленка нефти задерживает диффузию газов из атмосферы в воду и нарушает газовый обмен водоема, создавая дефицит кислорода;
- маслянистые вещества, покрывая поверхность жабр тонкой пленкой, нарушают газообмен и приводят к асфиксии рыб;
- водорастворимые соединения легко проникают в организм рыб;
- при концентрации нефти 0,1 мг/л мясо рыб приобретает неустранимый «нефтяной» запах и привкус;
- донные отложения нефти подрывают кормовую базу водоемов и поглощают кислород из воды.

Отработанные нефтепродукты классифицируются в зависимости от состава, свойств и назначения в три основные группы: масла моторные отработанные (ММО); масла промышленные отработанные (МИО) и смесь нефтепродуктов отработанных (СНО) [22]. Указанная классификация отработанных масел несколько отличается от классификации, принятой в ФККО (табл. 3.1.).

Таким образом, отработанным маслом является любое масло, полученное из сырой нефти или синтетического масла, использованное и в результате такого использования загрязненное физическими или химическими примесями.

Таблица 3.1 – Группы отработанных нефтепродуктов [2; 22]

Группа	Состав отработанных нефтепродуктов	Наименование отхода или группы по ФККО (класс опасности – к.о.)	Основные направления использования
ММО	Масла моторные отработанные:	отходы минеральных масел моторных (III к.о.); отходы синтетических и полусинтетических масел моторных (III к.о.)	Сырье для регенерации и получения других нефтепродуктов
	универсальные		
	карбюраторные		
	дизельные		
	авиационные		
МИО	Масла отработанные: индустриальные	отходы минеральных масел индустриальных (III к.о.); отходы синтетических и полусинтетических масел индустриальных (III к.о.)	Сырье для регенерации и очистки и получения других нефтепродуктов
	трансмиссионные	отходы минеральных масел трансмиссионных (III к.о.)	
	газотурбинные и турбинные	отходы минеральных масел турбинных (III к.о.)	
	трансформаторные	отходы минеральных масел трансформаторных, не содержащих галогены (III к.о.); отходы масел трансформаторных, содержащих полихлорированные дифенилы и терфенилы (I к.о.); отходы масел трансформаторных, содержащих полихлорированные дифенилы и трихлорбензол (I к.о.); отходы масел трансформаторных и теплоносителей, содержащих галогены (II к.о.)	
	компрессорные	отходы минеральных масел компрессорных (III к.о.); отходы синтетических масел компрессорных (III к.о.); масла синтетические компрессорные, загрязненные низкомолекулярным полиэтиленом в производстве полиэтилена (III к.о.)	
	гидравлические	отходы минеральных масел гидравлических, не содержащих галогены (III к.о.); отходы масел гидравлических, содержащих галогены (II к.о.)	
	антикоррозионные (консервационные)	–	
	Электроизоляционные	отходы синтетических и полусинтетических масел электроизоляционных (III к.о.)	

Группа	Состав отработанных нефтепродуктов	Наименование отхода или группы по ФККО (класс опасности)	Основные направления использования
СНО	Нефтяные промывочные жидкости	нефтяные промывочные жидкости, утратившие потребительские свойства, не загрязненные веществами 1 – 2 классов опасности; нефтяные промывочные жидкости, содержащие нефтепродукты менее 70 %, утратившие потребительские свойства; нефтяные промывочные жидкости на основе керосина отработанные (III к.о.)	Сырье для нефтепереработки, в качестве компонента котельного топлива; взамен других нефтепродуктов
	масла, применявшиеся при термической обработке металлов	смесь масел минеральных отработанных (трансмиссионных, осевых, обкаточных, цилиндрических) от термической обработки металлов (III к.о.)	
	цилиндрические, осевые масла		
	масла для прокатных станов		
	масла, извлекаемые из отработанных нефтяных эмульсий	эмульсии масел компрессорных установок (III – IV к.о.)	
	смеси нефти и нефтепродуктов, собранные при зачистке средств хранения, транспортирования и извлекаемые из очистных сооружений и нефтесодержащих вод	смеси нефтепродуктов, собранные при зачистке средств хранения и транспортирования нефти и нефтепродуктов; смеси нефтепродуктов, собранные при зачистке средств хранения и транспортирования стабильного газового конденсата; гидравлическое масло, отработанное при очистке газовых выбросов; всплывшие нефтепродукты из нефтеловушек и аналогичных сооружений и др. (III к.о.)	
	специальные жидкости: смазочно-охлаждающие; тормозные и др.	отходы смазочных материалов для технологического оборудования на основе минеральных масел обводненные (III к.о.)	

Механизмы деградации некоторых ММО и МИО представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Основные механизмы и последствия деградации масел [23]

Факторы воздействия	Механизм деградации	Последствия деградации
Абразивный износ смазываемых механизмов	механическое засорение	увеличение содержания металлических и полимерных частиц
Нагрев в результате трения и от соприкосновения с источниками тепла	испарение	уменьшение доли легких фракций, увеличение вязкости
	термическое или термоокислительное разложение (коксование)	образование коллоидного кокса, сажи, асфальто-смоляных соединений
Контакт с воздухом	окисление, полимеризация и конденсация	структурное изменение углеводородов, увеличение доли высокомолекулярных соединений и коррозионно-активных соединений (солей, кислот)
	обводнение	увеличение концентрации воды;
	микробиологическое заражение (повреждение)	появление и рост популяций бактерий, грибков, повышение концентраций пирогенных веществ
Неисправность оборудования, нарушение герметичности систем, нарушение условий хранения	химическое загрязнение	загрязнение топливом, сажей, выпадение присадок
Нейтрализация неорганических кислот, взаимодействие с продуктами окисления масла и топлива и др.	расход присадок	структурное изменение углеводородов; увеличение доли высокомолекулярных соединений и коррозионно-активных соединений
Воздействие электрического поля	окисление	структурное изменение углеводородов; увеличение доли коррозионно-активных соединений; образование асфальто-смоляных соединений
	разложение	
Воздействие высокого давления	микродизелинг	образование коллоидной сажи

Таким образом, основными последствиями эксплуатации являются загрязнение масел взвешенными частицами (пылью, волокнами, металлами, сажей и коксом) и каплями воды, а также химические превращения углеводородов и присадок. При окислении парафиновых и нафтеновых углеводородов образуются растворимые соединения кислого характера, а при окислении ароматических углеводородов – асфальто-смоляные соединения.

Перечисленные в таблице факторы влияют на масло одновременно, и некоторые механизмы деградации многократно усиливают действие друг друга. Например, частицы железа являются активными катализаторами процесса

окисления масла, а вода интенсифицирует коррозию и износ металлических узлов (рис. 3.1).

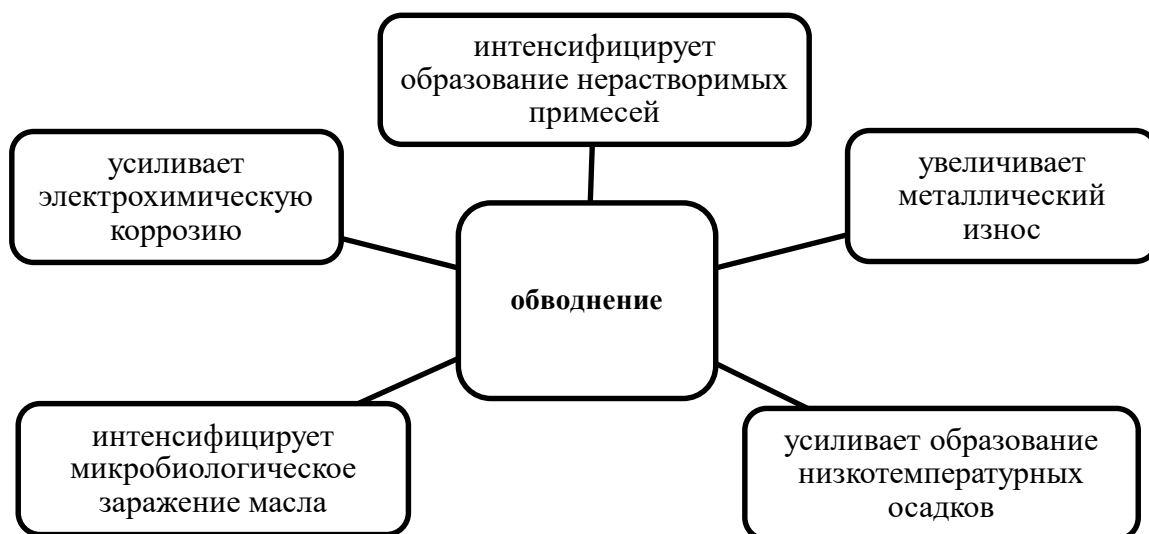


Рис. 3.1. Влияние обводнения моторного масла на его свойства [23]

Доля моторных масел составляет более 40 % от общего потребления масел в России, причем половина из них – моторные масла из автомобилей с бензиновыми и дизельными двигателями. Состав углеводородов и состав примесей варьируется для моторных масел в зависимости от типа двигателя. В отработанных маслах дизельных двигателей преобладают коллоидные частицы кокса и сажи, карбены и карбоиды, а в бензиновых – асфальто-смоляные соединения, карбены и карбоиды. Для газовых двигателей от 40 % до 60 % загрязняющих веществ в отработанном моторном масле представляют собой несгораемые примеси – соединения металлов, минеральные соли.

В последние годы увеличилось потребление синтетических и полусинтетических моторных масел, которые повсеместно применяются на автотранспорте, поскольку обладают лучшими характеристиками, чем минеральные. Синтетические масла в отличие от минеральных имеют максимальную химическую и термическую стабильность, и, поскольку молекулы имеют одинаковый размер, для поступательного движения деталей двигателя затрачивается меньше энергии (рис. 3.2).

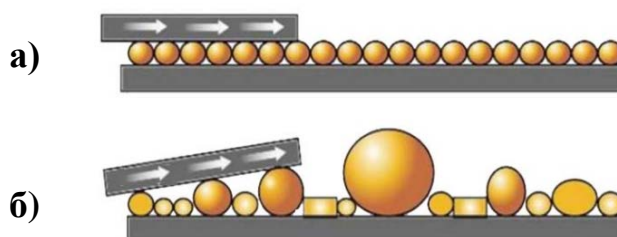


Рис. 3.2. Схема смазывания поверхностей деталей двигателя:
а) синтетическим маслом; б) минеральным маслом

В связи с этим состав отходов моторных масел минеральных, полусинтетических и синтетических несколько отличается (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Состав отходов моторных масел (по данным из различных источников информации) [24 – 28]

Компонент	Содержание компонента в отходе моторного масла, %						
	минерального [24-27]				синтетического и полусинтетического [25-26, 28]		
Углеводороды	97,95	94,2	88,66	84	94,8	95,9	91,64
Механические примеси	1,02	1,8	1	3	2,5	1	5,08
Вода	-	4	2	4	2,7	2	3,28
Химические загрязнители (оксиды, соли и др.)	-	-	8,34	8	-	1,1	-
Присадки	1,03	-	-	1	-	-	-

Сравнение информации о составе отработанных минеральных и синтетических моторных масел подтверждает более высокую химическую и термическую стабильность вторых. Однако на сегодня отходы синтетических, минеральных и полусинтетических масел не накапливаются и не собираются селективно, что снижает эффективность их регенерации.

Все перечисленные особенности отходов моторных масел необходимо учитывать при выборе оптимальной схемы обращения.

3.2. Утилизация отходов автомобильных масел

Отработанные масла, направляемые на утилизацию или подготовленные к восстановлению, должны соответствовать требованиям, предъявляемым национальным стандартом РФ к отработанным нефтепродуктам (табл. 3.4).

В зависимости от глубины изменения показателей и первоначальных свойств масла применяют физические, физико-химические, химические и термические методы утилизации.

Таблица 3.4 – Физико-химические показатели отработанных масел

Наименование показателя	Норма для группы	
	ММО	МИО
Условная вязкость при 20 °С, сСт	более 40	13–40
Кинематическая вязкость при 50 °С, сСт	более 35	5–35
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	100	120
Массовая доля механических примесей, %, не более	1	
Массовая доля воды, %, не более	2	
Содержание иных загрязнений, %	0	
Массовая доля фракций, выкипающих до 340 °С, %, не более	10	
Температура застывания фракций, выкипающих выше 340 °С, °С	-10	
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	905	–

Согласно требованиям федерального законодательства, выбор направления утилизации отходов минеральных и синтетических масел осуществляется с учетом следующей приоритетности:

1) полное или частичное восстановление показателей качества масел с целью их повторного использования по прямому назначению;

2) утилизация отходов масел с получением новой продукции без применения термических методов;

3) утилизация отходов масел с получением новой продукции термическими методами [7].

Регенерация отходов автомобильных масел является многоступенчатым процессом. С помощью физических методов из масел, утративших потребительские свойства, удаляют механические примеси, воду, с помощью физико-химических и химических методов осуществляют удаление легкокипящих (топливных) фракций, продуктов окисления или поликонденсации углеводородов (табл. 3.5).

Таблица 3.5 – Методы утилизации отходов автомобильных масел

Группа методов	Метод	Эффективность удаления примесей		
		воды	механических примесей	легкокипящих фракций, продуктов окисления или поликонденсации углеводородов
Физические	сепарация (под воздействием силовых полей)	+/-	+/-	-
	фильтрация (через пористые перегородки)	-	+/-	-
	седиментация (гравитационное осаждение)	+/-	+/-	-
	телофизическое разделение (выпаривание, вакуумная перегонка и др.)	+	-	+/-
Физико-химические	адсорбция	+	-	+
	коагуляция	+	+	+/-
	экстракция	-	-	+/-
	ионный обмен	-	-	+/-
Химические	сернокислотная и щелочная очистка	-	-	+
	каталитическое гидрирование	-	-	+/-
Термические	пиролиз	+	-	+
	газификация	+	-	+

Примечание. В таблице 3.5 «+» – метод эффективен; «-» – метод не эффективен; «+/-» – эффективность метода низкая или избирательная.

Полученное масло называется базовым. После процедуры контроля качества в него при необходимости вводятся добавки, улучшающие эксплуатационные свойства и придающие маслу новые свойства – присадки. Среди присадок можно выделить: противоокислительные агенты, ингибиторы коррозии, пеногасители, деэмульгаторы, детергенты, деактиваторы металлов и другие, которые составляют от 0,1 % до 30 % от объема масла.

Этапы утилизации отработанных масел сопровождаются выделением в атмосферный воздух углеводородов, аэрозолей и оксидов, образованием нефтезагрязненных сточных вод и отходов (сорбентов, шламов и др.).

Среди основных требований к установкам по утилизации автомобильных масел можно выделить:

- мобильность – ограниченные габаритные размеры и масса для возможности перемещения установки в места образования отходов масел;
- универсальность – способность регенерировать отработанные масла различных сортов и марок без существенных изменений технологии;
- простота конструкции – отсутствие сложных узлов и агрегатов, требующих высокой профессиональной подготовки обслуживающего персонала и значительных трудозатрат при техническом обслуживании и ремонте;
- экологическая безопасность – низкое потребление первичных материальных и энергетических ресурсов, отсутствие или минимальное количество выделяемых в воздух и воду вредных, токсичных и ядовитых веществ, вторичных отходов;
- низкие капитальные и эксплуатационные затраты [9, 29].

3.3. Выбор и расчет основного оборудования для утилизации автомобильных масел адсорбцией

Размер механических загрязнений, присутствующих в отработанном моторном масле автотранспорта, варьируется от 0,01 до 80 мкм, однако основную массу частиц (около 70–80 %) составляют частицы размером от 1 до 5 мкм. Наиболее эффективным методом удаления взвешенных частиц является фильтрация, которая проводится в несколько этапов. Фильтры выбираются по расходу масла, тонкости очистки и ориентировочной эффективности.

В качестве первой ступени очистки может быть использован, например, сетчатый фильтр с тонкостью фильтрации 15–40 мкм.

Для доочистки масел от взвешенных веществ на последних стадиях регенерации применяют тонкую фильтрацию (с тонкостью очистки 5–15 мкм) и ультрафильтрацию (0,02–5 мкм). Наиболее распространенными являются полимерные мембраны; металлокерамические мембраны (высокопроизводительные), керамические и углеродные мембраны (высокотемпературные). Для удаления ферромагнитных частиц размером менее 0,5 мкм может также быть применена магнитная сепарация. Магнитные

сепараторы с зернистой загрузкой задерживают не только компоненты с ферромагнитными свойствами, но и немагнитные взвешенные вещества [30, 31].

Расчет фильтров сводится к определению площади фильтровальных элементов, гидравлического сопротивления фильтра, продолжительности работы фильтра до регенерации или замены. В свежем масле по ГОСТу допускается не более 0,015 % механических примесей. Концентрация взвешенных частиц на выходе из фильтра рассчитывается по формуле:

$$C_{1\text{ВВ}} = (1 - \eta_{\text{ВВ}}) \cdot C_{0\text{ВВ}}, \%,$$

где $\eta_{\text{ВВ}}$ – ориентировочная эффективность разделения в фильтре, доли от 1;

$C_{0\text{ВВ}}$ – концентрация взвешенных веществ в масле до поступления на стадию фильтрации, %.

Адсорбционная очистка применяется для удаления из масла влаги и снижения кислотного числа и занимает второе место по объему промышленного применения. В качестве адсорбентов применяют полярные и неполярные вещества природного происхождения (отбеливающие глины, бокситы, природные цеолиты, вермикулит и др.) и полученные искусственным путем (силикагель, алюмосиликатные соединения, синтетические цеолиты и др.). Естественные адсорбенты имеют меньшую адсорбционную активность, чем активированные кислотным выщелачиванием и синтетические адсорбенты. Для депарафинизации отработанных масел применяют неполярные адсорбенты (активированный уголь и др.).

Адсорбционная очистка может осуществляться:

- контактным методом – масло перемешивается с измельченным адсорбентом;
- перколяционным методом – очищаемое масло пропускается через неподвижный адсорбент;
- методом противотока – масло и адсорбент движутся навстречу друг другу.

Наиболее эффективным является метод противотока, при котором процесс протекает непрерывно, без остановки для замены или регенерации адсорбента, однако метод требует применения сложного оборудования. При перколяционной адсорбции часто применяется силикагель, что делает этот метод дорогостоящим (рис. 3.3).

Наибольшее распространение получила адсорбция на цеолитах. Подбором цеолитов с порами определенного размера можно проводить селективную адсорбцию некоторых соединений асфальто-смоляных веществ, алкенов, полициклических углеводов [32, 33].

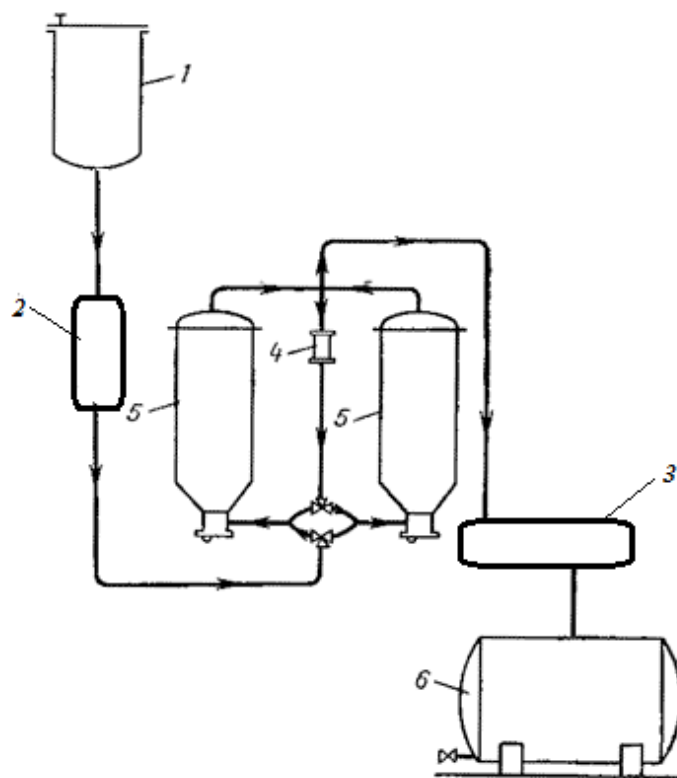


Рис. 3.3. Принципиальная схема установки для перколяционной адсорбции:
 1 – емкость для ММО; 2 – фильтр грубой очистки; 3 – фильтр тонкой очистки;
 4 – датчик уровня масла; 5 – адсорберы; 6 – емкость для регенерированного
 масла

Цеолит выполняет функцию осушителя, оксид алюминия химически связывает кислоты, однако поглощение сорбентом влаги замедляет адсорбцию кислот, поэтому расчет адсорбера проводится по воде и по кислоте. Определение продолжительности адсорбции воды проводится по формуле:

$$\tau = \left(\frac{a_0}{C_0 \cdot \omega_a} \right) \cdot \left(1 - \frac{\omega_a}{K_y} \cdot \ln \frac{C_0}{C_k} \right), \text{ с,}$$

где a_0 – величина адсорбции воды на цеолите, кмоль/м³;

C_0 – концентрация воды в масле, кмоль/м³;

C_k – требуемая концентрация воды в масле, кмоль/м³;

ω_a – линейная скорость движения масла в адсорбере, м/с;

K_y – коэффициент массопередачи, с⁻¹.

$$a_0 = a \cdot \rho_{\text{адс}}, \text{ кмоль/м}^3,$$

где a – величина удельной адсорбции воды при рабочих условиях, кмоль/г;

$\rho_{\text{адс}}$ – насыпная плотность цеолита, г/м³.

Величина удельной адсорбции определяется по изотерме адсорбции на цеолите.

Начальная концентрация воды в масле пересчитывается по формуле:

$$C_0 = \frac{\rho_{\text{м}}^{\text{раб}} \cdot C_0^{\%}}{M_{\text{воды}}} \text{ кмоль/м}^3,$$

где $\rho_M^{\text{раб}}$ – плотность масла при рабочих условиях, кг/м³;
 $C_0\%$ – начальная концентрация воды в отработанном масле, %;
 $M_{\text{воды}}$ – молярная масса воды, моль.

Аналогично рассчитывается требуемая концентрация воды в масле.

При расчете коэффициента массопередачи определяются коэффициенты теплообмена и коэффициенты массоотдачи.

Критерий Рейнольдса рассчитывается по формуле:

$$Re = \frac{\omega_a \cdot d_3 \cdot \rho_M^{\text{раб}}}{\mu_M^{\text{раб}}} = \frac{\omega_a \cdot d_3}{\nu_M^{\text{раб}}},$$

где d_3 – эквивалентный диаметр гранулы адсорбента, м;

$\mu_M^{\text{раб}}$ – динамическая вязкость масла при рабочих условиях, Па·с;

$\nu_M^{\text{раб}}$ – кинематическая вязкость масла при рабочей температуре адсорбции, м²/с.

Кинематическая вязкость и плотность моторного масла зависят от класса вязкости по стандарту SAE (Society of Automotive Engineers – сообщества автомобильных инженеров), марки масла, условий эксплуатации и степени его деградации, рабочей температуры в установке по утилизации. Исследования изменения показателей качества моторных масел в процессе эксплуатации в пределах нормативного срока технического обслуживания показали, что кинематическая вязкость отхода масел ниже вязкости свежего масла на 40–43 %, а плотность – на 2 %. Характеристики некоторых товарных моторных масел в интервале температур адсорбции приведены на графике (рис. 3.4) [34].

Эквивалентный диаметр гранулы адсорбента рассчитывается по формуле:

$$d_3 = 0,6 \cdot \left(\frac{d \cdot l}{\frac{d}{2} + l} \right), \text{ м},$$

где d – диаметр гранулы адсорбента, м;

l – длина гранулы адсорбента, м.

Критерий Прандтля определяется по формуле:

$$Pr = \frac{\nu_M^{\text{раб}}}{D_x},$$

где D_x – коэффициент диффузии частиц воды в масле, м²/с.

Критерий Нуссельта рассчитывается по формуле:

$$Nu = 4,1 \cdot Re^{0,714} \cdot Pr^{0,33}.$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе определяется по формуле:

$$\beta_x = \frac{Nu \cdot D_x}{d_3}, \text{ м/с}.$$

Коэффициент диффузии в порах определяется по формуле:

$$D_{\text{п}} = 0,2 \cdot D_x \left(1 - \exp \left[\frac{-4r}{3 \cdot D_x} \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{M_{\text{воды}}}} \right] \right), \text{ м}^2/\text{с},$$

где r – радиус пор, м;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);

T – температура адсорбции, К.

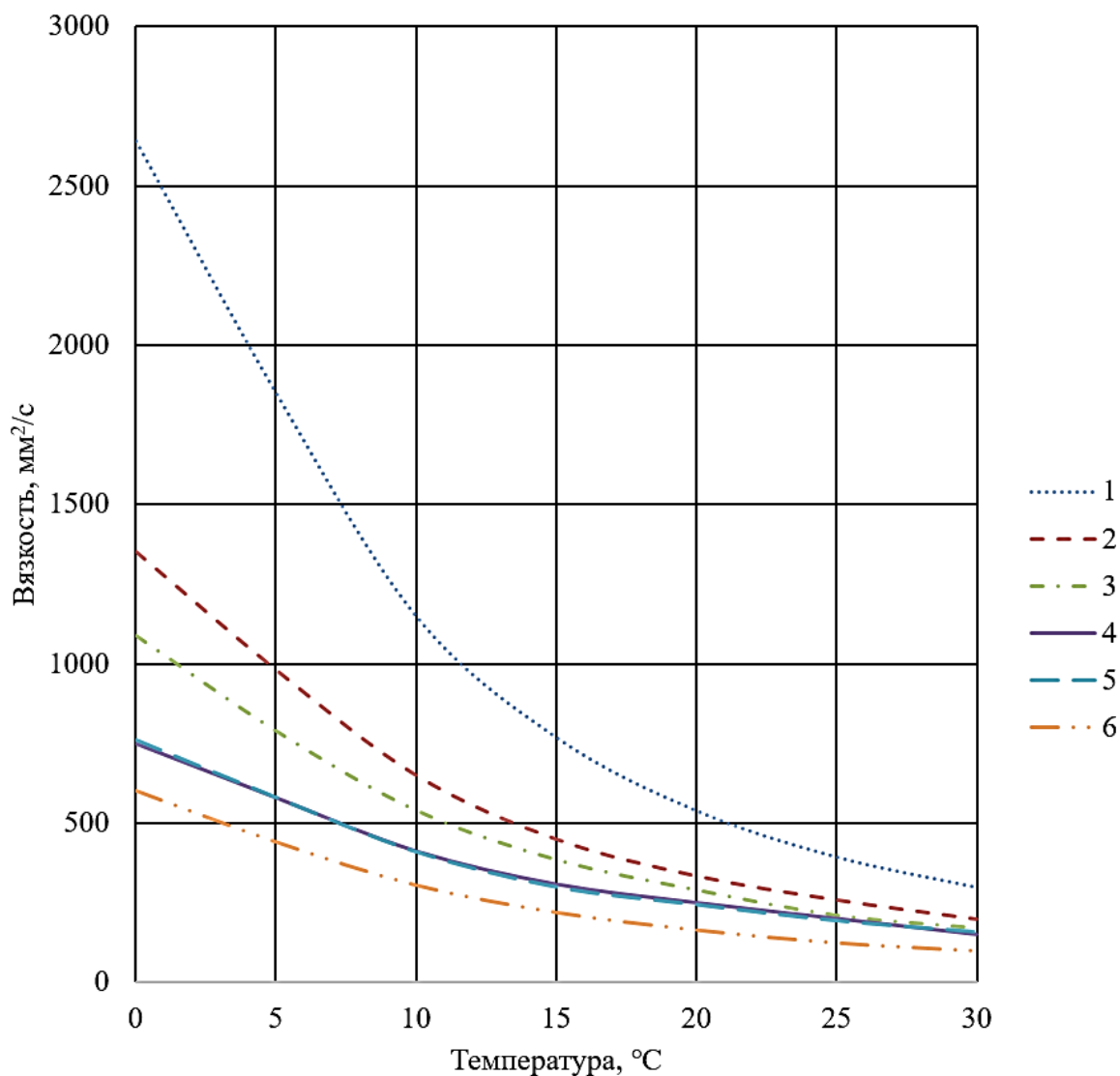


Рис. 3.4. График изменения кинематической вязкости моторных масел различных классов вязкости в диапазоне температур 0–30 °C: 1 – SAE 20W-50; 2 – SAE 15W-40; 3 – SAE 40W-50; 4 – SAE 5W-50; 5 – SAE 5W-40; 6 – SAE 5W-30

Коэффициент массоотдачи в порах определяется по формуле:

$$\beta_{\text{п}} = \frac{10 \cdot D_{\text{п}}}{d_3}, \text{ м/с.}$$

Коэффициент массопередачи вычисляется из уравнения аддитивности сопротивлений:

$$\frac{1}{K'_y} = \frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{\beta_{\text{п}}}, \text{ с/м.}$$

Для пересчета коэффициента массопередачи рассчитывается удельная поверхность адсорбции:

$$S_{\text{уд}} = \frac{6}{d} \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{l} \right), \text{ м}^2/\text{м}^3;$$

$$K_y = K'_y \cdot S_{\text{уд}}, \text{ с}^{-1}.$$

Расчет продолжительности адсорбции кислот выполняется аналогично расчету адсорбции воды.

С учетом уравнения реакции нейтрализации количество органического вещества (в пересчете на уксусную кислоту) на один кубометр масла определяется по формуле:

$$C_{\text{кисл}} = \frac{\text{TAN} \cdot M_{\text{кисл}} \cdot 1000}{M_{\text{КОН}}}, \text{ г/м}^3,$$

где TAN – кислотное число (концентрация КОН, необходимая для нейтрализации кислот в масле), гКОН/г;

$M_{\text{кисл}}$ – молярная масса уксусной кислоты, моль;

$M_{\text{КОН}}$ – молярная масса щелочи, моль.

Коэффициент диффузии уксусной кислоты в жидкой фазе находится по формуле:

$$D_x = \frac{7,4 \cdot 10^{-8} \cdot M_{\text{кисл}}^{0,5} \cdot T \cdot \rho_{\text{кисл}}}{\mu_{\text{м}}^{\text{раб}} \cdot M_{\text{кисл}}},$$

где $\rho_{\text{кисл}}$ – плотность уксусной кислоты, г/см³.

Итоговое время адсорбции определяется по компоненту, который сорбируется медленнее [35, 36].

Геометрические характеристики адсорбера рассчитываются на основе данных о требуемой производительности и скорости адсорбции.

Объем адсорбента определяется по формуле:

$$V = F_{\text{ад}} \cdot L_{\text{ад}}, \text{ м}^3$$

где $F_{\text{ад}}$ – площадь сечения адсорбера, м²;

$L_{\text{ад}}$ – высота слоя адсорбента, м.

Площадь активного сечения адсорбера рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{ад}} = \frac{V_{\text{м}}}{\omega_{\text{а}}}, \text{ м}^2,$$

где $V_{\text{м}}$ – объёмный расход масла (требуемая производительность), м³/с.

Внутренний диаметр адсорбера с круглым сечением может быть рассчитан по формуле:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{ад}}}{\pi}}, \text{ м.}$$

3.4. Выбор и расчет основного оборудования для утилизации автомобильных масел сепарацией

Большое распространение в сфере регенерации отработанных моторных масел от механических примесей и воды получил процесс центрифугирования (сепарации под действием центробежной силы). В процессе центрифугирования наиболее крупные взвешенные частицы смещаются к стенке сосуда, при этом формируя кольцо, состоящее из отложений. Следующее кольцо формируется из воды, очищенное масло собирается у оси вращения.

Эффективность очистки масла сепаратором определяется главным образом разностью плотностей масла и примесей, а также степенью дисперсности загрязняющих частиц. Для повышения эффективности перед

центробежной очисткой на отход можно воздействовать ультразвуковым полем, магнитным полем, обработать коагулянтами и др.

Для полного удаления из состава масла воды, ее нужно подвергать сепарации многократно. Поэтому системы очистки масла включают фильтр-прессы, которые позволяют доочистить сепарированное масло от остатков воды и механических примесей после центрифугирования, либо фильтрующие центрифуги (фильтр-сепараторы). Фильтр-сепаратор задерживает практически всю свободную воду и частицы загрязнений размером более 15 мкм, снижая при этом их содержание до 0,02–0,03 % (рис. 3.5). [37, 38].

Наиболее сильное воздействие на способность сепаратора удалять механические примеси малого размера оказывает температура масла. Для сепарирования моторных масел рекомендуется температура 60–80 °С (кинематическая вязкость при этом снижается на порядок), для трансформаторных и гидравлических масел – 65–75°. Поэтому перед центробежной сепарацией масло подается в теплообменник.

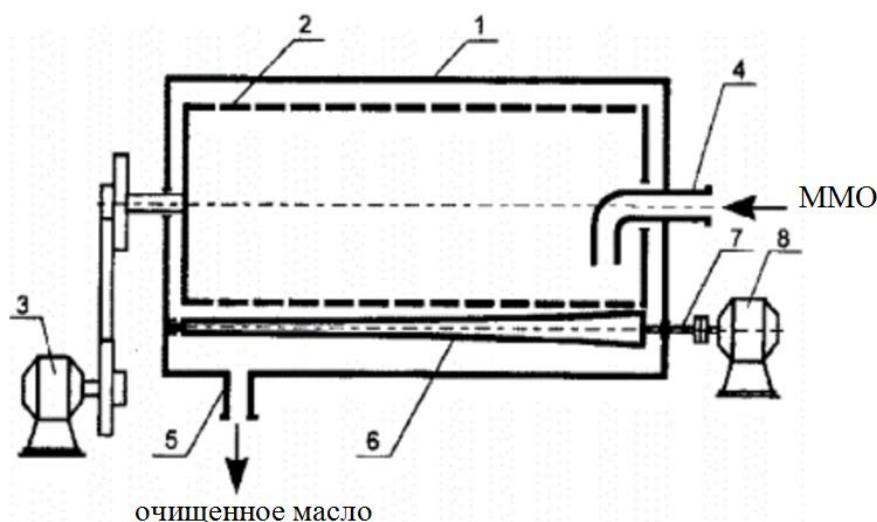


Рис. 3.5. Схема фильтра-сепаратора: 1 – корпус; 2 – фильтровальная перегородка; 3, 8 – электродвигатели; 4 – впускной трубопровод; 5 – выпускной трубопровод; 6 – устройство очистки (регенерации) фильтровальной перегородки; 7 – приводной вал устройства очистки фильтра

Отход масла может быть нагрет с использованием трубчатых электронагревателей (ТЭН), поверхностных или контактных теплообменников. Часть тепла, затрачиваемого на нагрев отработанного моторного масла, выделяется в окружающую среду и расходуется на нагрев элементов установки. Потери тепла могут быть определены из уравнения теплового баланса или примерно оценены по значению коэффициента полезного действия.

Расчет теплообменника сводится к определению количества тепла, необходимого для нагрева масла до заданной температуры и выбору подходящих нагревательных элементов и конструкций.

$$Q_{T/o} = V_M \rho_M^{раб} C_M (t_2 - t_1), \text{ кДж/час},$$

где V_M – расход масла, м³/час;

$\rho_M^{раб}$ – плотность масла при рабочих условиях, кг/м³;

C_M – удельная теплоемкость масла, кДж/кг·К;

t_1 – начальная температура масла, °С;

t_2 – конечная температура масла, °С.

Плотность масла при рабочей температуре рассчитывается по формуле:

$$\rho_M^{раб} = \rho_{M0} + \gamma \cdot (20 - t_2), \text{ кг/м}^3,$$

где ρ_{M0} – плотность ММО при температуре 20 °С, кг/м³;

γ – температурная поправка плотности нефтепродуктов (табл. 3.6).

Таблица 3.6 – Температурная поправка плотности нефтепродуктов

Плотность, кг/м ³	Температурная поправка	Плотность, кг/м ³	Температурная поправка
750,0–759,9	0,831	870,0–879,9	0,673
760,0–769,9	0,818	880,0–889,9	0,660
770,0–779,9	0,805	890,0–899,9	0,647
780,0–789,9	0,792	900,0–909,9	0,633
790,0–799,9	0,778	910,0–919,9	0,620
800,0–809,9	0,765	920,0–929,9	0,607
810,0–819,9	0,752	930,0–939,9	0,594
820,0–829,9	0,738	940,0–949,9	0,581
830,0–839,9	0,725	950,0–959,9	0,567
840,0–849,9	0,712	960,0–969,9	0,554
850,0–859,9	0,699	970,0–979,9	0,541
860,0–869,9	0,686	980,0–989,9	0,528

Мощность нагревательного элемента рассчитывается по формуле:

$$N_H = \frac{Q_{T/o}}{3600 \cdot \eta_{T/o}}, \text{ кВт},$$

где $\eta_{T/o}$ – коэффициент полезного действия теплообменного оборудования, доли от 1.

Из теплообменника масло поступает в блок центробежной очистки. Сепаратор выбирают из каталога исходя из требуемой объемной производительности (приложение 4). Расчет сепаратора проводится по механическим примесям и воде. Скорость осаждения механических примесей рассчитывается по формуле:

$$\omega_{ч} = \frac{\delta_{ч}^2 (\rho_{ч} - \rho_M^{раб}) \vartheta^2 R}{18 \mu_M^{раб}}, \text{ м/с},$$

где $\delta_{ч}$ – минимальный размер выделяемых из суспензии твердых частиц (крупность разделения), м;

$\rho_{ч}$ – плотность твердых частиц, кг/м³;

ϑ – угловая скорость сепаратора, рад/с;

R – средний радиус потока, м. Обычно средний радиус потока определяется как среднее арифметическое значение между внутренним радиусом ротора и

радиусом слива фугата. Под фугатом в данном расчете понимается масло, удаленное в слив в процессе центробежного разделения. Радиус слива фугата обычно составляет до четырех пятых долей внутреннего радиуса ротора.

Если известна кинематическая вязкость масла (рис. 3.6), то динамическую вязкость можно рассчитать по формуле:

$$\mu_M^{\text{раб}} = \nu_M^{\text{раб}} \cdot \rho_M^{\text{раб}}, \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

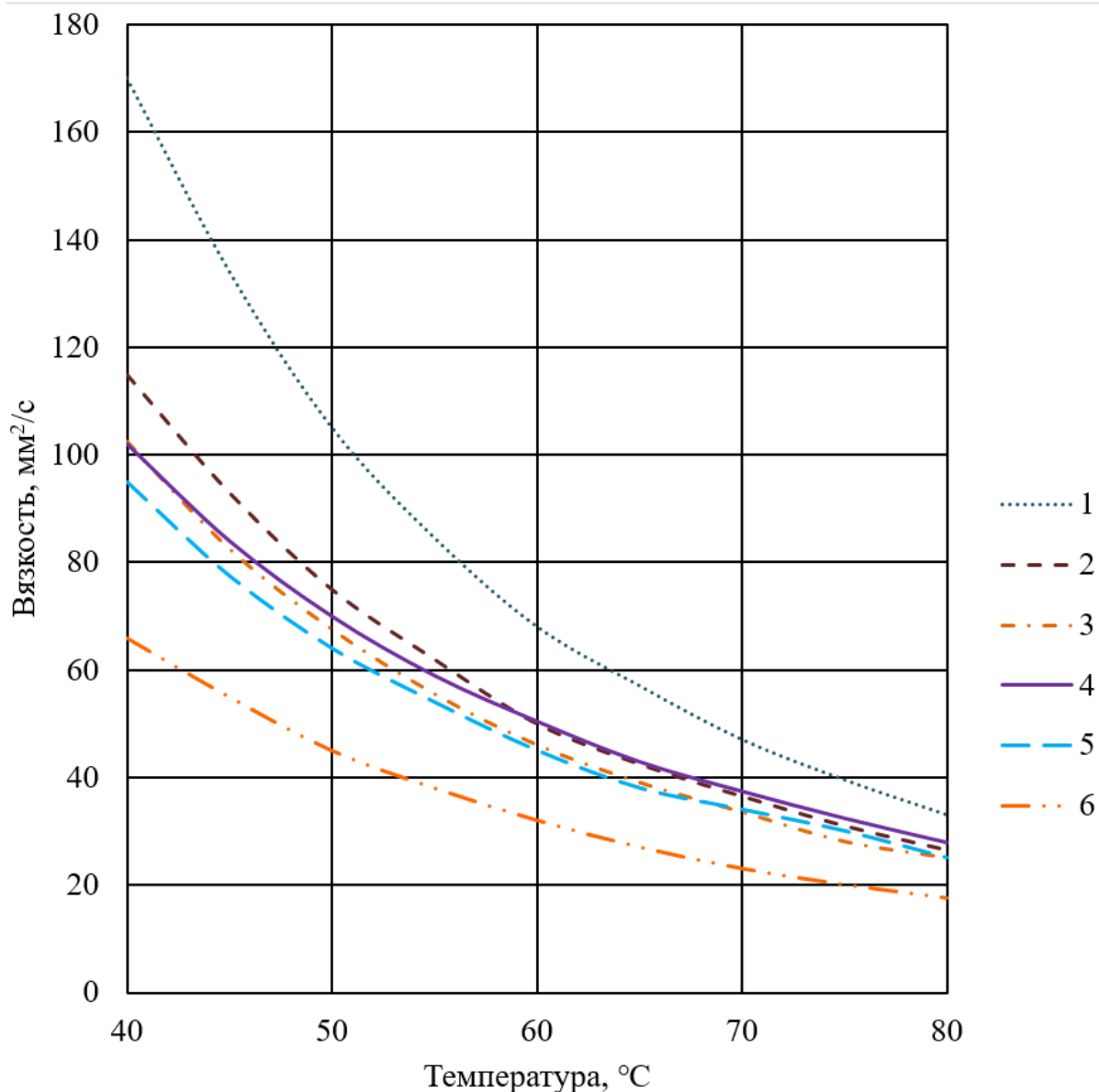


Рис. 3.6. График изменения кинематической вязкости моторных масел различных классов вязкости в диапазоне температур 40–80 °C: 1 – SAE 20W-50; 2 – SAE 15W-40; 3 – SAE 40W-50; 4 – SAE 5W-50; 5 – SAE 5W-40; 6 – SAE 5W-30

Формула для расчета скорости осаждения применима при ламинарном движении масла, если центробежный критерий Архимеда не превышает 33.

$$Ar_{ц} = \frac{\delta_{кч}^3 (\rho_{ч} - \rho_{м}^{раб}) \rho_{м}^{раб} g^2 R}{(\mu_{м}^{раб})^2}.$$

Для подтверждения пригодности выбранного сепаратора определяют его производительность по механическим примесям:

$$V_{с(ч)} = \eta_c \cdot \omega_{ч} \cdot 2\pi \cdot R \cdot L_0, \text{ м}^3/\text{с},$$

где η_c – коэффициент эффективности разделения, доли от 1. Для сепараторов периодического действия коэффициент эффективности разделения варьируется в диапазоне 0,35–0,45, для центрифуг непрерывного действия – 0,2–0,25;

L_0 – длина пути осаждения (длина цилиндрической части ротора центробежного сепаратора), м.

Расчет сепаратора по воде выполняется по аналогичным формулам. Скорость осаждения капель жидкости рассчитывается по выражению:

$$\omega_{ж} = \frac{\delta_{ж}^2 (\rho_{ж}^{раб} - \rho_{м}^{раб}) g^2 R}{18 \mu_{м}^{раб}}, \text{ м/с},$$

где $\delta_{ж}$ – минимальный размер выделяемых из суспензии частиц воды, м;
 $\rho_{ж}^{раб}$ – плотность жидкости (воды) при рабочих условиях, кг/м³.

Для расчета критерия Архимеда используется формула:

$$Ar_{ц} = \frac{\delta_{ж}^3 (\rho_{ж}^{раб} - \rho_{м}^{раб}) \rho_{м}^{раб} g^2 R}{(\mu_{м}^{раб})^2}.$$

Производительность сепаратора по подаваемой суспензии по воде

$$V_{с(ж)} = \eta_c \cdot \omega_{ж} \cdot 2\pi \cdot R \cdot L_0, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Производительность осадительной центрифуги по отделению твердой фазы может быть рассчитана по формуле:

$$G_T = V_c \cdot \rho_{м}^{раб} \cdot x_T,$$

где V_c – расчетная производительность центрифуги, м³/с;

x_T – массовая концентрация твердой фазы, доли [39, 40].

4. ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

4.1. Классификация и общие сведения о методах обезвреживания отходов

Обезвреживание может рассматриваться как самостоятельная процедура обращения с отходами или как стадия обращения с отходами, например, перед их транспортированием, утилизацией, размещением.

Ряд отходов недопустимо направлять на утилизацию или размещение без предварительного обезвреживания. К таким отходам относятся, например, медицинские отходы классов, имеющие потенциальную эпидемиологическую опасность «Б» и «В».

Можно выделить три группы методов, применяемых для обезвреживания отходов:

- 1) физико-химические;
- 2) термические и термо-химические;
- 3) биологические.

К первой группе относятся химическая нейтрализация, фиксация, ультрафиолетовое, микроволновое, электрическое или радиационное обезвреживание и др.

Ко второй группе – прямое сжигание, пиролиз, газификация и др.

К третьей группе относятся различные способы компостирования, биоремедиации, аэробное и анаэробное сбраживание, биодеструкция и др.

Химическая нейтрализация, как способ обезвреживания отходов, применяется в ряде случаев для твердых и жидких отходов.

Кислотные жидкие отходы нейтрализуются щелочными соединениями. Например, «жидкие отходы зачистки резервуаров хранения серной кислоты» (код ФККО: 31222911102) могут быть нейтрализованы гидроксидом кальция по схеме: $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Класс опасности понижается до IV, поскольку в результате отстаивания полученного осадка образуются «отходы зачистки резервуаров хранения серной кислоты нейтрализованные» (код ФККО: 31222912294), содержащие около 60 % воды, а также нерастворимые в воде сульфаты и прочие механические примеси.

Физические способы обезвреживания позволяют менять физическую структуру отходов с помощью электрического, магнитного или иного силового поля.

При пропускании электрического тока через грунты, загрязненные хлорированными углеводородами, фенолами и/или нефтепродуктами (например, свалочный грунт при ликвидации объектов накопленного вреда или старых объектов размещения отходов), одновременно протекают электролиз воды в поровом пространстве, электрофлотация, электрокоагуляция и электрохимическое окисление. Эффективность окисления фенола составляет

70–92 %. При этом образуется до 40 % продуктов неполного окисления фенола менее токсичных, чем фенол.

Для обезвреживания отхода «грунт, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание нефти или нефтепродуктов 15 % и более)» (код ФККО: 93110001393) эффективны ультразвуковые методы. Начиная с критического значения звукового давления акустических волн в жидкости возникает кавитация. При схлопывании кавитационных полостей образующиеся микроструи с линейными скоростями 300–800 м/с срывают с поверхности твердых частиц нефтяные загрязнения. При кавитационных разрывах жидкости происходит ионизация и активация молекул, стимулирующие окисление и полимеризацию углеводородных молекул. Эффективность обезвреживания может достигать 99,5–99,8 %, а класс опасности понижается до V.

Физические методы широко применяются для обезвреживания отходов животноводства. Для обеззараживания отходов ферм применяются СВЧ-воздействие, ультразвуковая кавитация, электрохимическое воздействие. При электролизе жидких отходов животноводства эффективность устранения патогенных микроорганизмов составляет 95–99 %, что позволяет снизить класс опасности отходов с III – IV до IV – V [2, 41 – 43].

Фиксация (иммобилизация, отверждение) отходов входит в число наименее приоритетных методов обезвреживания. Она проводится обычно перед размещением отходов для снижения подвижности высокотоксичных и реакционно-способных компонентов (тяжелых металлов, нефтепродуктов, кислот, щелочей и др.) и снижения их контакта с растворителями (водой).

Иммобилизация осуществляется путем смешения отходов с различными связующими веществами: цементом, золой, гипсом, известью, жидким стеклом, асфальтом и синтетическими полимерами, отходами стекла.

Использование цемента актуально для отходов с высокой влажностью, поскольку вода необходима для реакции цементирования. Этот метод используется для неорганических отходов, содержащих тяжелые металлы и ртуть, осадков от очистки сточных вод и жидких отходов газоочистки в химических производствах (например, может быть иммобилизован «осадок, содержащий ртуть и селен, мокрой очистки обжиговых газов цинкового производства при их утилизации в производстве кислоты серной», код ФККО: 31222401391) [2].

Недостатками фиксации с помощью цемента являются увеличение объема отходов и возможная коррозия цемента при низких значениях pH отходов; риск вымывания компонентов – цемент позволяет уменьшить растворимость веществ, но не ограничивает контакт с водой, поскольку пористость может быть достаточно большой (> 35 %).

Для повышения степени фиксации тяжелых металлов в цемент добавляют растворимые силикаты – жидкое стекло ($\text{Me}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$). Для увеличения pH может быть также добавлен известняк.

Иммобилизация с помощью известковых смесей осуществляется смешением отхода с мелко раздробленным кремнеземом и водой при

температуре окружающей среды. Источником кремнезема могут служить зола, обожженная глина, металлургический шлак. Процесс эффективен для неорганических отходов, содержащих тяжелые металлы.

Другой вариант технологии фиксации заключается в перемешивании влажного отхода (например, «осадка обработки хозяйственно-бытовых сточных вод известковым молоком, содержащий тяжелые металлы в количестве менее 5 %», код ФККО: 72216111334) с асфальтовой эмульсией и последующим нагреванием для испарения воды.

Иммобилизация с использованием отходов термопластов заключается в перемешивании сухих отходов с расплавленными отходами термопластов, после чего смесь охлаждается и затвердевает. Полимерный отход обволакивает отдельные частицы токсичного отхода и заполняет пустоты между ними, что предотвращает проникновение растворителей в продукт фиксации. В получившемся блоке обычно содержится 25–50 % отходов (сухого вещества), остальное – материал фиксации.

Фиксация в стекле обеспечивает скорости вымывания токсичных компонентов на несколько порядков ниже, чем смешение отходов с термопластическими материалами. Недостаток фиксации в стекле связан с большими затратами на организацию и проведение процесса [2, 44].

Термические методы позволяют обезвреживать жидкие, твердые, пастообразные и другие отходы и могут быть разделены на две группы: бесконтактные и контактные (с помощью высокотемпературного теплоносителя). По свойствам высокотемпературного теплоносителя методы могут быть разделены на пять основных групп:

- окислительно-огневой;
- пиролизный;
- паротермический;
- газификационный;
- плазмохимический [45].

Наибольшее распространение получил окислительно-огневой метод – прямое сжигание.

С технологической точки зрения сжигание представляет собой способ обезвреживания отходов в инсинераторах с одновременным использованием этих отходов в качестве топлива и утилизацией выделившейся теплоты, а в ряде случаев и образовавшихся золы и шлака.

Эффективность применения прямого сжигания для получения тепловой энергии зависит главным образом от зольности, содержания горючих веществ и влажности отхода. Согласно исследованиям, отходы зольностью более 60 %, влажностью более 50 % и с содержанием органической массы менее 30 % самостоятельно поддерживать горение не могут. Изображенная на рисунке 4.1 треугольная диаграмма (треугольник Таннера) позволяет оценить соотношения основных параметров горючих отходов, при которых горение может быть осуществлено без использования дополнительного топлива [46].

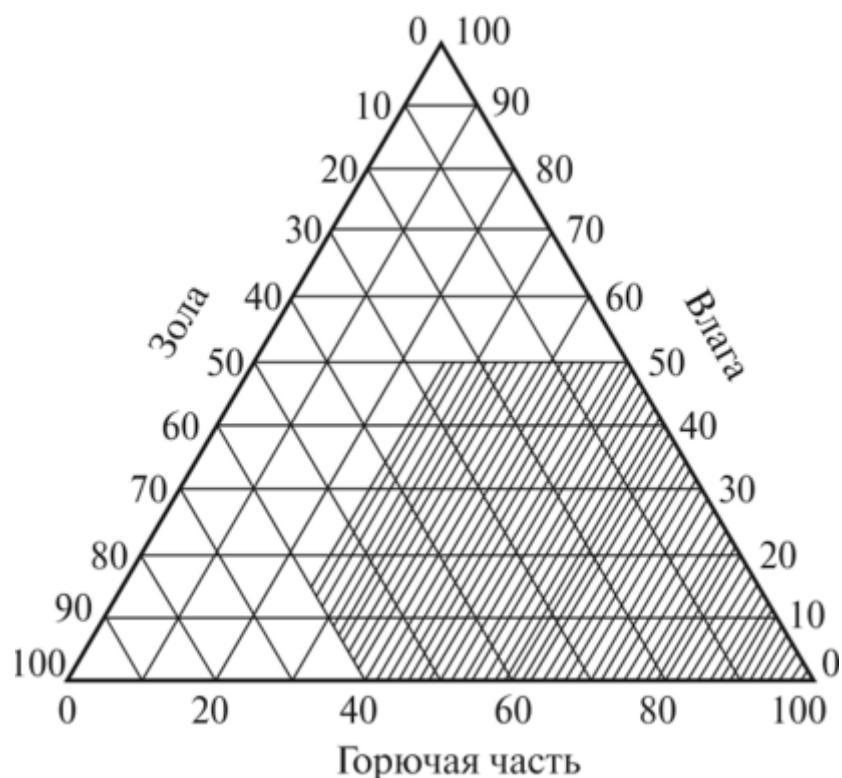


Рис. 4.1. Треугольник Таннера

Например, при прямом сжигании отходов «осадок механической очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства обезвоженный» (код ФККО: 30681132394) и «осадок (ил) биологической очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства обезвоженный» (код ФККО: 30685123205) в смеси с кородревесными отходами от подготовки древесины образуется отход «зола от сжигания кородревесных отходов и осадков очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства» (код ФККО: 74221111494) или «зола от сжигания кородревесных отходов и осадков очистки сточных вод целлюлозно-бумажного производства, содержащая преимущественно диоксид кремния» (код ФККО: 74221112495). Класс опасности отхода при этом не снижается, однако масса отхода в некоторых случаях может уменьшиться на 50–80 %, что совпадает с определением понятия «обезвреживание». Зольность смеси перечисленных обезвоженных осадков и отходов варьируется от 16 до 50 %, влажность – от 47 до 75 %. Низшая теплота сгорания смеси при различных соотношениях составляет от 7,4 до 18,7 МДж/кг, что подтверждает возможность их сжигания без дополнительного топлива и целесообразность утилизации выделившегося тепла.

В зависимости от целей обезвреживания и характеристик отходов применяют инсинераторы различных конструкций: полочные, камерные, барабанные, с «кипящим» слоем и др. (табл. 4.1) [2, 47].

Таблица 4.1 – Область применения и сравнительная характеристика инсинераторов для обезвреживания отходов

Конструкция инсинератора	Область применения	Температура отходящих из топки газов, °С	Коэффициент избытка воздуха	Основные недостатки
Камерная	твердые коммунальные и подобные им отходы	650 – 900	1,08 – 1,2	большие размеры, повышенная металлоемкость; высокое содержание вредных веществ в дымовых газах
Многоподовая	шламы; осадки от очистки сточных вод (ОСВ)	350 – 620	1,08 – 1,2	повышенная металлоемкость; высокая доля уноса несгоревших частиц отходов; сложность механизмов и высокая стоимость оборудования
Барабанная	ТКО, СНО, отходы растворителей	650 – 1000	1,1 – 1,6	большие размеры; низкая удельная весовая нагрузка топочного объема; высокая чувствительность к изменению температурного режима; высокое содержание вредных веществ в дымовых газах
Со стационарным «кипящим» слоем	ТКО, СНО, осадки от ОСВ, шламы	600 – 850	1,04 – 1,3	высокое содержание взвешенных веществ в дымовых газах
С вихревым «кипящим» слоем	пыли газоочистки; древесные отходы; сельскохозяйственные отходы; осадки от ОСВ; отходы синтетических полимеров	1200	1,04 – 1,6	высокое содержание взвешенных веществ в дымовых газах; высокая температура дымовых газов; необходимость в рекуператорах инертного материала
С циркулирующим «кипящим» слоем	коро-древесные отходы; сельскохозяйственные отходы; осадки от очистки сточных вод	600 – 850	1,04 – 1,6	высокое содержание взвешенных веществ в дымовых газах; высокая температура дымовых газов; необходимость в рекуператорах инертного материала
Распылительная	осадки от очистки сточных вод	650 – 850	1,04 – 1,8	низкая производительность, высокая стоимость оборудования

Пиролиз представляет собой процесс термического разложения отходов, содержащих органические вещества, при недостатке окислителя (окислительный пиролиз) или в отсутствие окислителя (сухой пиролиз), в результате чего образуются твердый углеродистый остаток и пиролизный газ, содержащий высококипящие смолообразные вещества.

В результате сухого пиролиза отходов образуются пиролизный газ (пирогаз) с высокой калорийностью, жидкие продукты и твердый углеродистый остаток (кокс или полукокс). Количество и качество продуктов сухого пиролиза зависят от состава отходов и температуры процесса. В зависимости от температуры различают три вида сухого пиролиза:

- Низкотемпературный пиролиз (полукоксование) реализуется в диапазоне температур 450–550 °С. Этот вид сухого пиролиза характеризуется максимальным выходом жидких продуктов и полукокса (биоуголь) и минимальным выходом калорийного пирогаза.

- Среднетемпературный пиролиз реализуется в диапазоне температур 500–800 °С. При этом выход пирогаза увеличивается при одновременном уменьшении его теплоты сгорания, а выход жидких продуктов и коксового остатка уменьшается.

- Высокотемпературный пиролиз (коксование) реализуется в диапазоне температур 900 °С – 1050 °С. При высокотемпературном коксовании минимален выход жидких продуктов и твердого остатка и максимален выход пиролизных газов с пониженной теплотой сгорания.

Пиролизу могут быть подвергнуты отходы пластмасс, резины, шламы нефтепереработки и прочие СНО, пищевые и твердые коммунальные отходы, древесные отходы и др.

Технологии паротермического обезвреживания отходов (паровой термолиз) иногда относят к технологиям низкотемпературного окислительного пиролиза. Термолиз представляет собой термическое разложение органосодержащих отходов в среде перегретого пара с температурой 300–450 °С с последующим сжиганием газообразных продуктов.

Термолизу могут быть подвергнуты отходы резины; древесные отходы; отходы синтетических полимеров; жидкие отходы открытых карт размещения в смеси отходов производств эфиров метилметакрилата и полимеров на их основе, содержащие метилметакрилат и его производные 55 % и более; отходы жидкие открытых карт размещения, содержащие метилметакрилат и его производные; отходы битума нефтяного; отходы зачистки оборудования производств изопропилбензола, метилметакрилата в смеси, содержащие преимущественно ароматические углеводороды; изделия керамического производственного назначения, утратившие потребительские свойства, малоопасные; тара из черных металлов, загрязненная нефтепродуктами и лакокрасочными материалами; отходы железобетона, загрязненные нефтью или нефтепродуктами; отходы гидроизоляционных материалов на основе стекловолокна и др.

Газификация – это процесс термической обработки отходов, содержащих органические вещества, одним или несколькими окислителями (воздухом, кислородом, водяным паром, углекислым газом или их смесью) с расходом ниже стехиометрического при температуре 600–1000 °С, с получением генераторного газа (синтез-газа) и твердого или расплавленного зольного остатка.

Газификации могут быть подвергнуты отходы пластмасс, резины, шламы нефтепереработки и прочие СНО, пищевые и твердые коммунальные отходы, отходы лесозаготовки и лесопереработки, отходы сельского хозяйства и др.

Плазмохимические методы обезвреживания отличаются от окислительно-огневых методов источником тепловой энергии и температурой процесса. Плазма выступает в роли генератора газов с температурой свыше 2000 °С, заменяя продукты сгорания органического топлива.

Основными вариантами использования плазменных источников энергии в технологиях высокотемпературной переработки и обезвреживания промышленных, медицинских, твердых коммунальных и им подобных отходов являются:

- плазмохимическое обезвреживание в плазменной дуге;
- обезвреживание ударной плазменной струей;
- обезвреживание в плотном фильтруемом слое с использованием плазменных источников энергии;
- дожигание отходящих из инсинераторов дымовых газов с помощью плазменных источников энергии.

Плазмохимические методы применяются, в основном, для обезвреживания медицинских отходов и высокотоксичных промышленных отходов: тяжелых остатков перегонки пиролизной жидкости, нефти, (мазута, гудрона); отходов конденсаторов с трихлордифенилом, пентахлордифенилом; отходов трансформаторов с пентахлордифенилом; отходов масел трансформаторных и иных, содержащих полихлорированные дифенилы и терфенилы, и др. Однако методы пригодны и для обезвреживания сельскохозяйственных отходов, ТКО, коксовых отходов пиролиза ТКО и СНО, отходов производственного потребления и др. [8].

Пример установки для обезвреживания отходов плазменной струей изображен на рисунке 4.2.

В струю низкотемпературной плазмы через загрузочное устройство подаются отходы в порошковом, пастообразном или жидком виде. В плазмохимическом реакторе в результате действия высокотемпературной плазмы вещества разлагаются на атомарные, молекулярные и ионизированные частицы, которые в дальнейшем образуют малотоксичный газ, состав которого формируется термодинамическими характеристиками процесса [48].

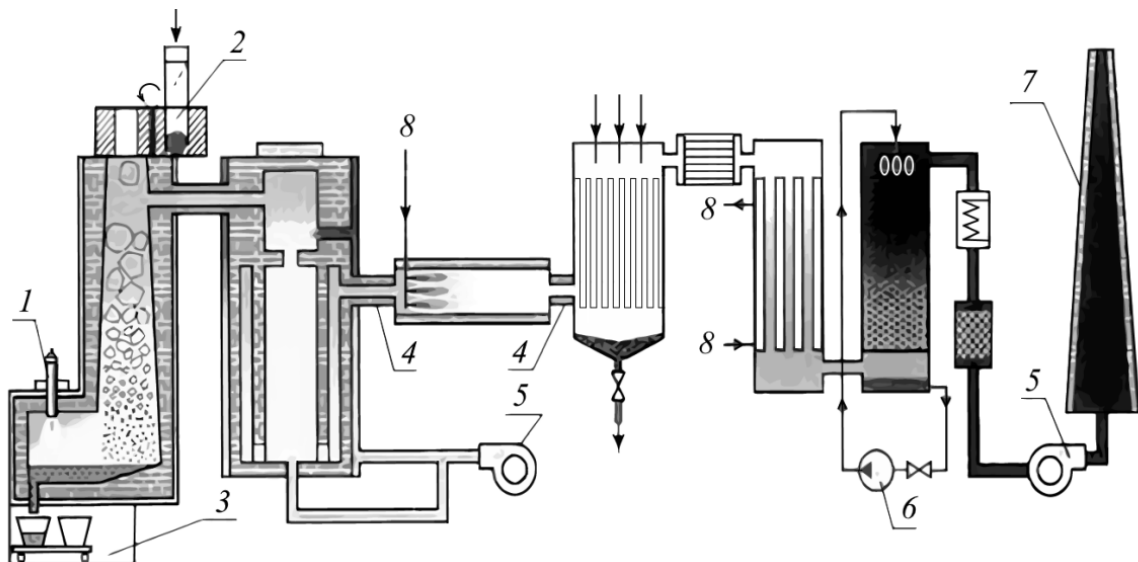


Рис. 4.2. Схема плазмохимической установки для утилизации отходов:
 1 – плазменная горелка; 2 – загрузочное устройство; 3 – система выгрузки и удаления стеклообразного остатка; 4 – изолированный газовый тракт;
 5 – дымосос; 6 – насос; 7 – дымовая труба; 8 – теплоноситель для охлаждения рекуператора (вода)

Более подробно процессы и аппараты для реализации термического обезвреживания и утилизации отходов производства и производственного потребления изучаются в рамках дисциплины «Энергосбережение в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии». Технологии и оборудование для термического обезвреживания и энергетической утилизации ТКО рассматриваются в дисциплине «Технология обращения с твердыми коммунальными отходами» [49].

К методам биологического обезвреживания относятся биоразложение органических отходов, биоремедиация, компостирование и сбраживание.

Биологические методы обезвреживания применяют для органосодержащих отходов, находящихся в жидкой, пастообразной и твердой формах.

Биоразложение с применением специальных биопрепаратов используются, в основном, для обезвреживания отходов пластмасс и нефтепродуктов (в т. ч. нефтезагрязненных грунтов). Под биопрепаратом понимают препараты на основе штаммов микроорганизмов, безопасных для людей и окружающей среды.

Биопрепараты на основе штаммов нефтеокисляющих микроорганизмов подразделяются на две основные группы:

- биопрепараты на основе монокультуры (один штамм микроорганизмов);
- полибактериальные биопрепараты (несколько штаммов микроорганизмов).

Обезвреживание отходов методом биоразложения может происходить путем загрузки отходов в биореактор или путем внесения биопрепаратов в

отход по месту его образования или накопления. Последний способ характерен для обезвреживания отходов нефтесодержащих загрязненных грунтов.

Полибактериальные препараты имеют более широкие адаптационные и экологические возможности для использования. Эффективность биопрепарата определяется его способностью очистить загрязненный нефтепродуктами участок в почвенно-климатических условиях средней полосы РФ за 1 сезон. По рекомендациям специалистов любой препарат-биодеструктор становится эффективным при расходе препарата на количество нефтяных загрязнений 0,01 кг/кг.

При использовании биореакторов из нефтесодержащих отходов удаляются крупные включения, отход подвергается перемешиванию с добавлением воды, а биопрепарат вносится в суспензию [9].

Для осуществления процесса в твердофазном биореакторе необходима корректировка влажности и внесение органических наполнителей (солома, сено, лузга подсолнечная, торф, опилки и др.). Органический наполнитель предварительно измельчается до фракции 1–3 мм. Необходимое количество наполнителя рассчитывается исходя из заданной начальной влажности смеси (от 60 до 65 %). Биопрепарат вносится в смесь отхода и наполнителя в виде суспензии, состоящей из воды, микроорганизмов и питательных солей.

Процесс биоразложения проводится до получения требуемого содержания нефти в обезвреживаемой среде. В биореакторе поддерживается температура 15–45 °С, при этом смесь перемешивается специальным устройством на всю глубину один раз в несколько суток.

Компостирование – процесс биологической трансформации и обезвреживания органического отхода, протекающий в аэробных условиях, позволяющих получить биостабилизированные продукты, свободные от патогенов и обладающие полезными свойствами, например, способностью улучшать плодородие почв. На практике компостирование применяют для обезвреживания отходов растительного происхождения, отходов скотобоен и других отходов сельского хозяйства.

В результате жизнедеятельности микроорганизмов в самом отходе происходит его саморазогревание до 60 °С. При такой температуре погибают болезнетворные и патогенные микроорганизмы. Примером обезвреживания отходов животноводческих комплексов методом компостирования является обеззараживание в биотермических ямах [9].

Распространенным направлением обезвреживания отходов является биоремедиация.

Биоремедиацией называется комплекс методов очистки вод, грунтов и атмосферы с использованием метаболического потенциала биологических объектов – растений, грибов, насекомых, червей и других организмов.

Частным случаем биоремедиации является вермикомпостирование – это технологический процесс, при котором популяция технологических дождевых червей используется для переработки органических отходов в гумусоподобный материал. Вермикомпостированию подвергаются почвы, загрязненные

поллютантами от кожевенного и цементного производств, отходы и осадки ЦБП, лесотехнической, пищевой промышленности, ТКО и др. [50].

Для обезвреживания отходов могут быть использованы и другие биологические объекты. Например, утилизация и обезвреживание лигноцеллюлозных отходов может быть проведено путем выращивания на них базидиальных грибов, на крахмалсодержащих отходах культивируют *Aspergillus niger* и др. [51].

Наиболее крупномасштабные примеры применения биологических методов обезвреживания связаны с аэробным и анаэробным сбраживанием жидких отходов (осадков сточных вод). При аэробной обработке происходит окисление органики кислородом воздуха. Анаэробные процессы являются более сложными и заключаются в микробиологической конверсии органических веществ, в том числе спиртов, альдегидов, сложных кислот с образованием в итоге метана как основного компонента продукта, называемого биогаз. Более подробно об анаэробном сбраживании рассматривалось на практических занятиях.

4.2. Обезвреживание органосодержащих отходов путем анаэробной ферментации

Биологические способы утилизации и обезвреживания отходов позволяют не только снизить опасность отходов для окружающей среды, но и получить ценные продукты для использования в сельском хозяйстве, городском хозяйстве и др. (ферментов, удобрений, грунтов и др.).

Жидкофазной анаэробной ферментацией называется процесс сбраживания органического сырья с содержанием сухих веществ (СВ) 0,5–13 об. % в анаэробных условиях. Наиболее подходящим сырьем являются жидкие сельскохозяйственные отходы с содержанием СВ более 3–8 об. %, например, разведенные навоз, помёт и подстилка после гидросмыва.

Твердофазной анаэробной ферментацией считается процесс сбраживания органического сырья с содержанием СВ более 13 об. %. Обычно сырьем для твердофазной ферментации служат сельскохозяйственные отходы, пищевые отходы, ТКО, осадки от очистки хозяйственно-бытовых сточных вод, органосодержащие шламы некоторых производств (например, спиртового) и др.

В результате анаэробной ферментации органических веществ различного происхождения получают биогаз, состоящий из метана CH_4 (55–70 %); углекислого газа CO_2 (28–43 %); сероводорода (до 0,1 %), а также других сопутствующих газов: толуола, аммиака, ксилола, формальдегида, оксида углерода, оксидов азота и проч. Состав биогаза существенно варьируется в зависимости от состава и свойств сбраживаемых отходов. Расход биогаза, получаемого из несортированных ТКО на полигонах, составляет до 200 м³/т, из осадков от очистки сточных вод – 70–300 м³/т, из отходов животноводческих хозяйств – 70–600 м³/т, из отходов растениеводства – 30–450 м³/т. Поэтому одним из современных направлений повышения выхода биогаза является

коферментация – совместное сбраживание отходов растительного и животного происхождения. Например, навоз и помет рекомендуется подвергать анаэробному сбраживанию в смеси с углеродсодержащими материалами растительного происхождения: торфом, опилками, соломой и др. [52].

Анаэробное сбраживание биомассы происходит в несколько стадий, каждая из которых характеризуется протеканием процессов в специфических условиях (рис. 4.3).

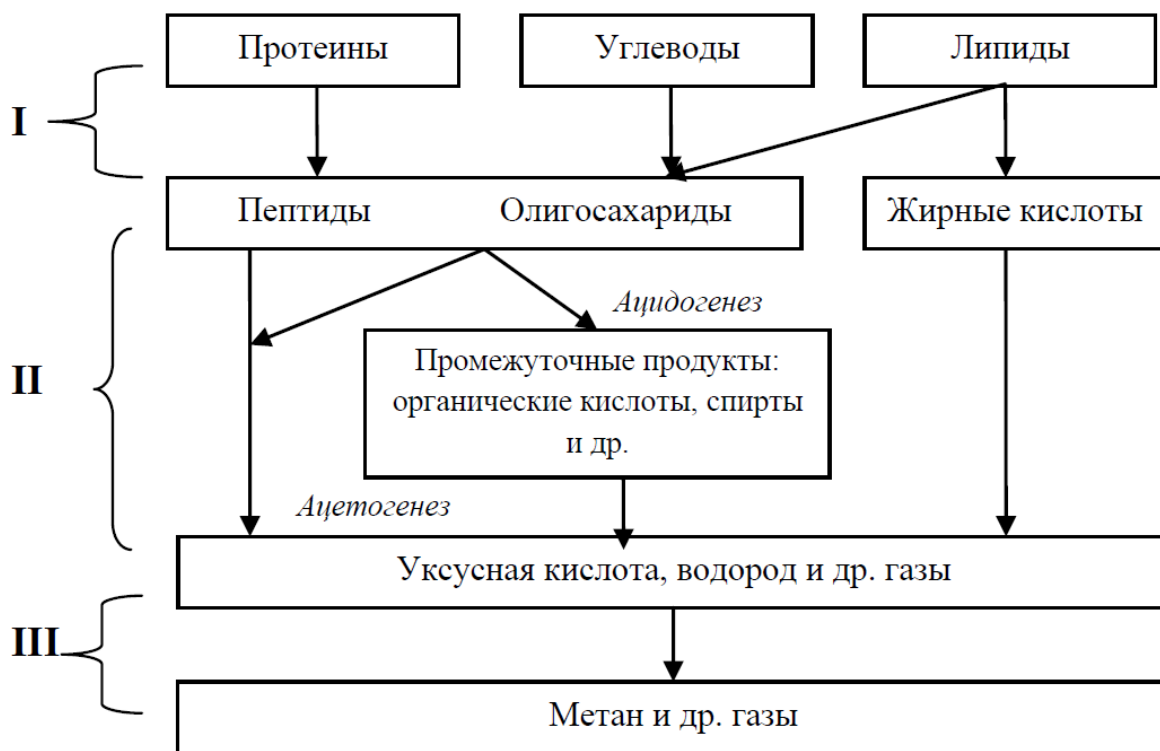


Рис. 4.3. Блок-схема анаэробного сбраживания органической массы: *I* – стадия гидролиза; *II* – стадия ферментации; *III* – метановая стадия

I. На стадии гидролиза сложные биополимерные молекулы (протеины, липиды, углеводы) расщепляются аэробными бактериями до более простых – пептидов, жирных кислот, олигосахаридов.

II. На стадии ферментации, иначе называемой кислотной стадией, происходят ацидогенез и ацетогенез – мономеры разрушаются до органических кислот, аминокислот, спиртов и газов. Процесс осуществляют сапрофитные анаэробные бактерии в кислой среде, pH 4,5–7.

III. На метановой стадии вещества разлагаются метанобразующими бактериями (строго анаэробными) до метана, углекислого газа, азота и водорода. Фаза считается щелочной, pH 6–8.

Для эффективного осуществления анаэробного сбраживания, как правило, требуется определенное начальное количество культур микроорганизмов, которые вводятся в биомассу дополнительно в виде биопрепарата – прививочного осадка.

Оптимальные температуры размножения метанобразующих бактерий: 0–25 °С – психрофильное сбраживание; 30–35 °С – мезофильное сбраживание; 50–55 °С – термофильное сбраживание; 60–65 °С – экстратермальное (экстратермофильное) сбраживание [52].

Применение термофильного режима анаэробного сбраживания позволяет провести обезвреживание отходов – снизить экотоксичность, содержание возбудителей инфекционных заболеваний, реакционную способность и коррозионную активность. Эффективность дегельминтизации при указанном температурном режиме достигает 94–100 %. Одновременно с этим снижаются объем и масса отходов. Ориентировочные потери массы некоторых сельскохозяйственных отходов составляют: для жидкого навоза – 2–3 %, для подстилочного навоза – 10–15 %; для кукурузного силоса – 20–30 %; для зерносенажа – 70–80 % [53].

Сам биогазовый реактор (метантенк) представляет собой герметичную секционированную емкость, заполненную органическим отходом. Формы биореакторов, применяемых в различных технологиях анаэробного сбраживания, могут быть классифицированы как:

- яйцеобразная;
- цилиндрическая;
- прямоугольная;
- траншейная и др.

С точки зрения движения жидкостей, наиболее эффективной является яйцеобразная форма метантенка, но строительство реакторов такой конструкции – сложный и дорогостоящий процесс. Оптимальной является цилиндрическая форма с коническим или полусферическим дном и куполом, но в промышленности применяются и цилиндрические реакторы с плоским дном. Реакторы прямоугольного или квадратного сечения из бетона или кирпича не рекомендуются к использованию, так как в углах образуются трещины из-за давления сырья, а также собираются твердые частицы, что нарушает процесс сбраживания. Исследования показывают, что отношение диаметра метантенка к его глубине должно находиться в пределах 1:1–1:0,8 [54].

На эффективность работы биогазового реактора большое влияние оказывает предварительная подготовка биомассы. Чем меньше размеры частиц органических компонентов исходного сырья, тем больше их удельная поверхность и, соответственно, интенсивнее происходят процессы сбраживания. Для придания биомассе однородной и гомогенной структуры используются механические, ультразвуковые и гидродинамические кавитационные деструкторы [55].

Оптимальное время сбраживания (время оборота реактора) представляет собой период анаэробного сбраживания, за который выделяется наибольшая доля биогаза. Время оборота реактора зависит от состава биомассы, дозы загрузки реактора и температурного режима сбраживания. В зависимости от температурного режима ориентировочное время оборота реактора варьируется в следующих диапазонах:

- психрофильный режим: 30 и более суток;
- мезофильный режим: от 10 до 30 суток;
- термофильный режим: от 5 до 10 суток.

Время оборота реактора корректируется с учетом состава отходов и, например, в условиях мезофильного температурного режима составляет:

- для жидкого навоза крупного рогатого скота (КРС): 10–15 суток;
- для жидкого навоза свиней: 10–12 суток;
- для жидкого куриного помета: 10–20 суток;
- для навоза, смешанного с растительными отходами: не менее 30 суток.

Эффективной является также технология двухфазного анаэробного сбраживания осадков от очистки сточных вод, основанная на экстратермофильном режиме работы биогазового реактора (метантенка) первой фазы и мезофильном режиме второй фазы. При этом среднее время нахождения отхода в метантенке составляет около 11 суток. Двухфазная технология обеспечивает увеличение степени распада органического вещества осадка по сравнению с мезофильным режимом в 1,2–1,6 раза (в зависимости от концентрации сухого вещества в осадке) [56].

Реакция метанового брожения экзотермическая и сопровождается выделением около 1,5 МДж/кг сухой массы. Для некоторых регионов (в том числе для Ленинградской области) этого количества тепла недостаточно для поддержания в реакторе требуемого температурного режима, поэтому необходим дополнительный подогрев биомассы. Подвод тепла осуществляется перегретым паром под давлением, горячей водой (50–60 °С) или электронагревательными элементами.

Для уменьшения потерь тепла биореактору необходима надежная теплоизоляция. От 30 до 100 % получаемого в реакторе биогаза расходуется на поддержание необходимого температурного режима работы.

Метантенки также могут быть оснащены дополнительно мешалками, средствами контроля и управления процессами и другими вспомогательными устройствами.

Методы перемешивания, применяемые в различных биогазовых технологиях, можно разделить на:

- механические;
- гидравлические;
- барботажные.

При удалении сброженной биомассы необходимо учитывать, что в ней содержится значительное остаточное количество биогаза. Биогаз удаляют в бассейнах-дегазаторах, после чего биомассу сгущают. Удаленная из сброженной биомассы жидкость может быть использована повторно для разведения субстрата [57].

На рисунке 4.4 изображена наиболее распространенная технологическая схема получения биогаза из отходов животноводческих комплексов.

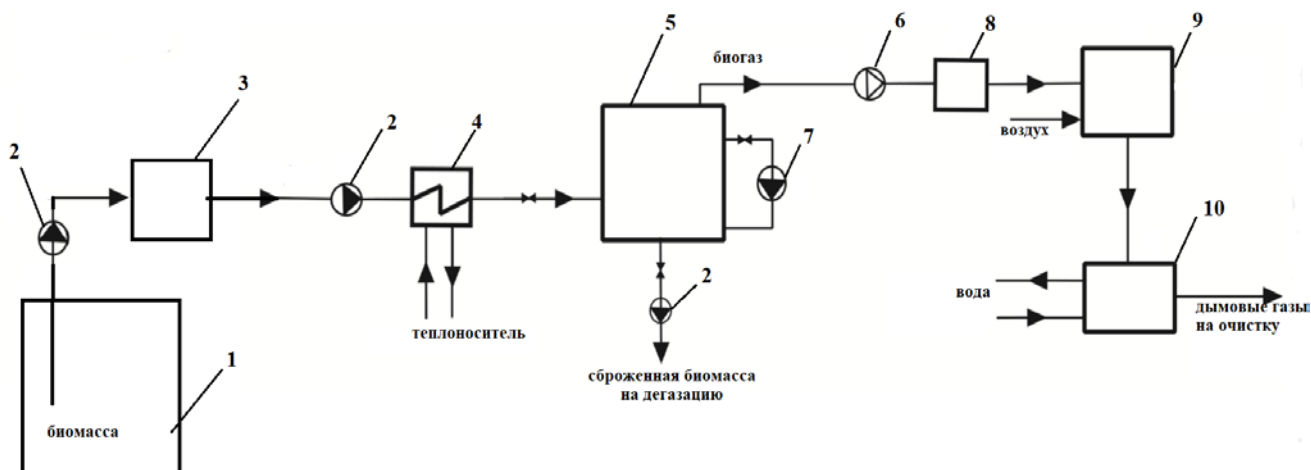


Рис. 4.4. Схема анаэробного сбраживания отходов животноводческого комплекса с системой гидравлического перемешивания:

- 1 – навозохранилище; 2 – шламовые насосы; 3 – блок подготовки субстрата;
 4 – теплообменник типа «труба в трубе»; 5 – биогазовый реактор;
 6 – компрессор; 7 – циркуляционный насос; 8 – блок подготовки и хранения биогаза; 9 – энергетическая установка; 10 – котел-утилизатор тепла

Как видно из рисунка 4.4, для анаэробного сбраживания отходов в промышленных масштабах требуется разработка комплексной технологии, включающей в себя дополнительное оборудование: комплекс для подготовки биомассы, систему очистки биогаза, газгольдер, оборудование для сжигания биогаза, систему очистки дымовых газов и др.

4.3. Выбор и расчет оборудования для анаэробной ферментации органосодержащих отходов

На начальных стадиях выбора и расчета оборудования для анаэробного сбраживания отходов задаются требуемым температурным режимом и требуемой производительностью установки исходя из характеристик отходов, подлежащих обезвреживанию.

Суточный объем биомассы может быть рассчитан по формуле:

$$W_{\text{б}} = \frac{G_{\text{б}}}{\rho_{\text{б}}^{\text{раб}}}, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где $G_{\text{б}}$ – суточный массовый расход биомассы, поступающей на обезвреживание, кг/сут;

$\rho_{\text{б}}^{\text{раб}}$ – плотность подаваемой биомассы при рабочих условиях, кг/м³.

Поскольку в метантенк подается жидкая биомасса влажностью 86–92 %, плотность подставляется в формулу с учетом введенных в биомассу воды и добавок. Плотность жидкого навоза КРС и овец при температуре 20 °С составляет 1010–1020 кг/м³; свиного навоза – 1050–1070 кг/м³; птичьего помёта – 700–1005 кг/м³. Плотность субстрата при рабочих условиях может быть определена по формуле:

$$\rho_6^{\text{раб}} = \rho_6 - 0,046 \cdot \bar{t}_6, \text{ кг/м}^3,$$

где ρ_6 – плотность подаваемой биомассы при начальной температуре, кг/м³;

\bar{t}_6 – среднее арифметическое значение начальной и требуемой температур биомассы, °С.

Для обеспечения заданного температурного режима сбраживания в холодный и переходный периоды года перед подачей в реактор сельскохозяйственные отходы подогревают. Расчет теплообменника сводится к определению количества тепла, необходимого для нагрева субстрата до заданной температуры и выбору подходящих нагревательных элементов и конструкций.

Количество тепла, необходимое для первоначального нагрева биомассы, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{т/о}}^{\Sigma} = G_6 \cdot \theta \cdot C_6 \cdot (t_{62} - t_{61}) \cdot 10^{-3}, \text{ МДж},$$

где θ – время оборота реактора, сут,

C_6 – удельная теплоемкость биомассы, кДж/кг·К. Средняя удельная теплоемкость жидкого навоза и помёта составляет 4,18 кДж/кг·К;

t_{61} – начальная температура биомассы, °С;

t_{62} – требуемая температура биомассы, °С.

Поскольку суточная доза загрузки метантенка при непрерывном режиме работы составляет обычно 1/10 – 1/20 от общего объема сырья в реакторе, для поддержания оптимальной температуры теплообменник может работать в периодическом режиме, при этом суточное количество потребляемой тепловой энергии составит:

$$Q_{\text{т/о}} = G_6 \cdot C_6 \cdot (t_{62} - t_{61}), \text{ кДж/сут.}$$

Для выбора метантенка рассчитывается его минимальный объём:

$$V_{\text{мет}}^{\text{min}} = \frac{W_6 \cdot \theta}{k_3}, \text{ м}^3,$$

где k_3 – коэффициент заполнения метантенка, доли от 1. Рабочее пространство реактора заполняется не более, чем на 2/3, поскольку биомасса в процессе анаэробного сбраживания увеличивается в объёме. Метантенк может быть выбран из каталога, приведенного в приложении 5.

Максимальный суточный выход биогаза из метантенка определяется по формуле:

$$L_{\text{БГ}} = \frac{L_{\text{СН}_4}}{C_{\text{СН}_4}^{\%}} \cdot 100, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где $L_{\text{СН}_4}$ – суточный выход метана из реактора, м³/сут;

$C_{\text{СН}_4}^{\%}$ – концентрация метана в биогазе, %.

Суточный выход метана из метантенка можно рассчитать по формуле:

$$L_{\text{СН}_4} = V_{\text{мет}}^{\text{min}} \cdot \frac{B_0 \cdot S_0}{\theta} \cdot \frac{1 - K_6}{\theta \cdot \mu_{\text{м/о}} - 1 + K_6}, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где B_0 – предельный выход метана за сутки с одного кг органического вещества, м³/(сут·кг);

S_0 – концентрация органического вещества в биомассе, подаваемой в метантенк, кг/м³;

K_6 – кинетический коэффициент;

$\mu_{м/о}$ – максимальная скорость роста микроорганизмов, сут⁻¹.

Концентрация органического вещества в биомассе, подаваемой в метантенк, определяется по формуле:

$$S_0 = \frac{G_{\text{сух}} \cdot S_0'}{W_6}, \text{ кг/м}^3,$$

где $G_{\text{сух}}$ – суточный выход сухих веществ, кг/сут;

S_0' – доля органического вещества в биомассе, подаваемой в метантенк, доли от 1.

$$G_{\text{сух}} = G_6 \cdot C_{\text{сух}}, \text{ кг/сут},$$

где $C_{\text{сух}}$ – доля сухих веществ в биомассе, доли от 1.

Кинетический коэффициент в соответствии с теорией управляемого культивирования микроорганизмов зависит от состава сбраживаемой биомассы и определяется по одной из следующих формул:

для жидкого навоза КРС – $K_6 = 0,8 + 0,0016 \cdot e^{0,06 \cdot S_0}$;

для свиного навоза – $K_6 = 0,5 + 0,0043 \cdot e^{0,091 \cdot S_0}$;

для птичьего помёта – $K_6 = 0,6 + 0,0206 \cdot e^{0,051 \cdot S_0}$.

Скорость роста микроорганизмов зависит от температурного режима анаэробного сбраживания:

$$\mu_{м/о} = 0,013 \cdot T_{62} - 0,129, \text{ сут}^{-1},$$

где T_{62} – требуемая (рабочая) температура биомассы в метантенке, К [58 – 60].

Сброженная в метантенке биомасса подается на дегазацию, после чего направляется на обезвоживание, уплотнение и сушку (до минимальной влажности 15–20 %), после чего-либо классифицируется как отходы V (для свиного навоза – IV) класса опасности или как продукция [2]. Количество сброженной биомассы может быть ориентировочно оценено по формуле:

$$G_{\text{СБ}} = \frac{0,2 \cdot (G_{\text{сух}} - (L_{\text{БГ}} \cdot \rho_{\text{БГ}}))}{1000}, \text{ т/сут},$$

где $\rho_{\text{БГ}}$ – плотность биогаза, кг/м³.

Более подробно процессы и аппараты для сжигания биогаза изучаются в рамках дисциплины «Энергосбережение в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральный закон от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ (с изм. и доп. от 07.04.2020) «Об отходах производства и потребления» // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19109/ (дата обращения: 14.03.2023). – Текст: электронный.
2. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 г. № 242 (с изм. и доп. от 16.05.2022) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218071/ (дата обращения: 14.03.2023). – Текст: электронный.
3. Приказ Минприроды России от 30.09.2011г. № 792 «Об утверждении Порядка ведения государственного кадастра отходов» // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_121841/(дата обращения: 14.03.2023). – Текст: электронный.
4. ГОСТ 30772-2001. Межгосударственный стандарт. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_135735/ (дата обращения: 21.03.2023). – Текст: электронный.
5. ГОСТ Р 54098-2010 Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Термины и определения // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200086000> (дата обращения: 21.03.2023). – Текст: электронный.
6. Распоряжение Правительства РФ от 25.07.2017 г № 1589-р «Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается» // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_221683/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/ (дата обращения: 23.03.2023). – Текст: электронный.
7. Приказ Минприроды России от 11.06.2021 г. № 399 «Об утверждении требований при обращении с группами однородных отходов I – V классов опасности» // КонсультантПлюс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_402074/ (дата обращения: 21.03.2023). – Текст: электронный.
8. ИТС НДТ 9-2020 «Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами» // Бюро НДТ: [сайт]. – 2023. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1500&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 20.02.2023). – Текст: электронный.
9. ИТС НДТ 15-2021 «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов)» // Бюро НДТ: [сайт]. – 2023. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1667&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 20.02.2023). – Текст: электронный.

10. ИТС НДТ 52-2022 «Обращение с отходами I и II классов опасности» // Бюро НДТ: [сайт]. – 2023. – URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1785&etkstructure_id=1872 (дата обращения: 20.02.2023). – Текст: электронный.
11. ГОСТ Р 54533-2011 (ИСО 15270:2008) Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководящие принципы и методы утилизации полимерных отходов // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097330> (дата обращения: 23.03.2023). – Текст: электронный.
12. ГОСТ 32626-2014 Средства укупорочные полимерные. Общие технические условия // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112648> (дата обращения: 23.03.2023). – Текст: электронный.
13. Решение Комиссии Таможенного союза от 16.08.2011г. № 769 (с доп. и изм. от 20.01.2020 г.) «О принятии технического регламента Таможенного союза ТР ТС 005/2011 "О безопасности упаковки"» // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_119326/c090d656a97a1e36dc19e9cb27ab67eb362dd8e4/ (дата обращения: 23.03.2023). – Текст: электронный.
14. К вопросу биодеструкции полимерных материалов в природных средах (обзор) / Лаптев А. Б., Голубев А. В., Киреев Д. М., Николаев Е. В. // Труды ВИАМ. – 2019. – № 9 (81). – С. 100–107.
15. Microbial degradation of plastics and approaches to make it more efficient / I. B. Kotova, Yu. V. Taktarova, E. A. Tsavkelova, M. A. Egorova, I. A. Bubnov, D. V. Malakhova, L. I. Shirinkina, T. G. Sokolova, E. A. Bonch-Osmolovskaya // Microbiology, 2021. Vol. 90, № 6 . P. 671–701.
16. Заикин, А. Е. Влияние перекиси на свойства смеси полипропилена и сополимера этилена с винилацетатом / А. Е. Заикин, Г. Б. Бобров // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 15 (7). – С. 67–70.
17. Заикин, А. Е. Компатибилизация смесей несовместимых полимеров наполнением / А. Е. Заикин, Г. Б. Бобров // Высокомолекулярные соединения. – 2012. – Серия А. – № 54 (8). – С. 1275–1282.
18. ГОСТ 33706-2015. Межгосударственный стандарт. Упаковка. Оптимизация использования упаковочных отходов в качестве вторичных энергетических ресурсов // Российский институт стандартизации : [сайт]. – 2021. – URL: <https://nd.gostinfo.ru/document/6861191.aspx> (дата обращения: 29.04.2023). – Текст: электронный.
19. Ревятко, М. М. Оборудование и основы проектирования предприятий по переработке пластмасс [Текст] : учеб. пособие / М. М. Ревятко, О. М. Касперович. – Мн.: БГТУ, 2005. – 344 с.
20. Кутовой, А. Терморегуляция процесса экструзии / А. Кутовой // Пластикс. – 2012. – № 4. – С. 46 – 50.

21. Кудрявцева, З. А. Проектирование производств по переработке пластмасс методом экструзии [Текст] / З. А. Кудрявцева, Е. В. Ермолаева. – Владимир: ВлГУ, 2003. – 96 с.
22. ГОСТ 21046-2021. Межгосударственный стандарт. Нефтепродукты отработанные. Общие технические условия // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200181669> (дата обращения: 29.04.2023). – Текст: электронный.
23. Тарасов, В. В. Причины и пути обводнения смазочного масла, образования в нем загрязнений и влияние их на срок службы масла и надежность судовых дизелей / В. В. Тарасов // Научные труды Дальрыбвтуза. – Владивосток, 2010. – №. 22. – С. 132 – 146.
24. ГОСТ 12337-84 Масла моторные для дизельных двигателей. Технические условия // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003556> (дата обращения: 29.04.2023). – Текст: электронный.
25. Приказ ГУПР и ООС МПР России по Ханты-Мансийскому автономному округу от 16.06.2004 г. № 75-Э «Об утверждении примерного компонентного состава опасных отходов, присутствующих в ФККО, которые не нуждаются в подтверждении класса опасности для окружающей природной среды» // Консорциум Кодекс : [сайт]. – 2023. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/411736956> (дата обращения: 29.04.2023). – Текст: электронный.
26. Кузьмин, Р. С. Компонентный состав отходов [Текст] : монография. Ч 1 / Р. С. Кузьмин. – Казань: Дом печати, 2007. – 156 с.
27. Методические рекомендации по разработке проекта нормативов предельного размещения отходов для теплоэлектростанций, теплоэлектроцентралей, промышленных и отопительных котельных [Текст] / А. И. Трегубов, Л. Н. Григорьев, Т. И. Буренина [и др.]. – СПб.: СПбГТУРП. – 1998. – 52 с.
28. Протокол №52/22-ОТ от 22.03.2022 г. Морфологического состава отхода испытательной лаборатории ООО «Тест» [Текст]. – СПб.: ООО «Тест», 2022. – 5 с.
29. Осадчий, Ю. П. Коагуляция продуктов старения моторного масла дорожных и строительных машин / Ю. П. Осадчий, А. В. Маркелов, Н. Е. Пахотин, О. А. Маркелова // Строительные материалы. – 2018. – №7. – С. 68 – 70.
30. Диагностическая интерпретация результатов анализа работавших моторных масел / Л. А. Певзнер, Г. Ш. Розенберг, В. Н. Спирина // Химия и технология топлив и масел. – 1994. – № 5. – С. 31 – 34.
31. Методы контроля и результаты исследования состояния трансмиссионных и моторных масел при их окислении и триботехнических испытаниях [Текст] : монография / В. И. Верещагин, В. С. Янович, Б. И. Ковальский [и др.]. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. – 208 с.

32. Шашкин, П. И. Регенерация отработанных нефтяных масел [Текст] / П. И. Шашкин, И. В. Брай. – М.: Химия, 1970. – 304 с.
33. Остриков, В. В. Современные технологии и оборудование для восстановления отработанных масел [Текст] / В. В. Остриков, А. Н. Зазуля, И. Г. Голубев. – М.: Росинформагротех, 2001. – 60 с.
34. Вишняков, А. В. Результаты исследования изменения эксплуатационных характеристик моторных масел на бензиновых двигателях / А. В. Вишняков, Л. А. Бердников // Современная техника и технологии. – 2015. № 10. – URL: <https://technology.snauka.ru/2015/10/7911> (дата обращения: 16.04.2023). – Текст: электронный.
35. Григорьев, Л. Н. Охрана окружающей среды при проектировании (атмосфера). Ч.1. [Текст] : учебное пособие / Л. Н. Григорьев, Т. И. Буренина. – СПб.: СПбГТУРП, 2004. – 92 с.
36. Липин, А. Г. Расчет адсорбционных установок [Текст] : учебное пособие / А. Г. Липин, А. А. Липин. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2014. – 60 с.
37. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии [Текст] / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – М.: Химия, 1972. – 496 с.
38. Malgorzata, F. Sorption of heavy metals ions from used engine oil [Текст] // J. FEB. 2012. Vol.25, P. 823 – 838.
39. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский [и др.] – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
40. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – Изд. 10-е, стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
41. Обезвреживание отходов: методы, технологии и оборудование // RCYCLE.NET : [сайт]. – 2023. – URL: <https://rcycle.net/othody/obrashhenie/obezvrezhivanie-metody-tehnologii-i-oborudovanie> (дата обращения: 16.04.2023). – Текст: электронный.
42. Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной переработки [Текст] / под ред. В. С. Кобрина. – Новосибирск: ГПНГБ, 1995. – 156 с.
43. Головкин, А. Н. Перспективы использования электрических методов для очистки жидких органических отходов животноводства / А. Н. Головкин, А. М. Бондаренко // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – № 41. – С. 52 – 57.
44. Калыгин, В. Г. Промышленная экология [Текст] : учебное пособие / В. Г. Калыгин. – М.: Изд. центр "Академия", 2004. – 432 с.
45. Анахов, С. В. О методах плазменной инсинерации в технологиях утилизации и обезвреживания отходов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин // АБУ. – 2017. – № 7 (161) – С. 46 – 51.

46. Белоусов, В. Н. Топливо и теория горения. [Текст] : учебное пособие. Ч. I. Топливо / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, О. С. Смирнова. – СПб.: СПбГТУРП. 2011. – 84 с.
47. Янин, Е. П. Сжигание осадков городских сточных вод (проблемы и способы) / Е. П. Янин // Ресурсосберегающие технологии. – 2006. – № 24 – С. 3 – 29.
48. Чередниченко, В. С. Плазменные электротехнологические установки [Текст] : учебник / В. С. Чередниченко, А. С. Аныпаков, М. Г. Кузьмин. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 602 с.
49. Васильева, Е. А. Технология обращения с твердыми коммунальными отходами [Текст] : учебно-методическое пособие / Е. А. Васильева. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – Часть 2. – 80 с.
50. Компостирование твердых органических отходов производства и потребления. Вермикомпостирование [Текст] : монография; под ред. Я. И. Вайсмана. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 557 с.
51. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты (обзор) / Н. А. Куликова, О. И. Кляйн, Е. В. Степанова, О. В. Королёва // Прикладная биохимия и микробиология. – 2011. – Том 47. – № 6. – С. 619–634.
52. Васильева, Е. А. Альтернативные источники энергии [Текст] : учебное пособие / Е. А. Васильева. – ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2018. – 43 с.
53. Капустин, В. П. Обоснование способов и средств переработки бесподстилочного навоза [Текст] / В. П. Капустин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – 80 с.
54. Вохмин, В. С. Разработка технологической линии утилизации биомасс животного и растительного происхождения / В. С. Вохмин, А. С. Линкевич, В. В. Касаткин, Н. Ю. Литвинюк // Научный журнал Кубанского ГАУ. – Краснодар: Кубанский ГАУ, 2011. – № 73. – С. 168 – 177.
55. Жумагажинов, А. Т. Способы интенсификации процессов анаэробного сбраживания / А. Т. Жумагажинов, Н. К. Алгазинов // Вестник Инновационного Евразийского университета. – 2014. – № 1. – С. 91 – 95.
56. Савельева, Л. С. Двухфазные технологии – перспективное направление повышения эффективности процесса анаэробного сбраживания осадков / Л. С. Савельева // Экспресс-информация ВИНТИ, серия «Ресурсосберегающие технологии», 1998. – № 12. – С. 10 – 20.
57. Коротовская, А. М. Реконструкция участка обработки осадков Очистных сооружений канализации г. Челябинска [Текст] / А. М. Коротовская. – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – 112 с.
58. Магомедов, А. М. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии [Текст] / А. М. Магомедов. – Махачкала: Юпитер, 1996. – 244 с.
59. Chen, Y. R., Hashimoto, A. G. Kinetics of methane fermentation. biotechnology and bioengineering symposium [Текст]. 1978. № 8. P. 269 – 282.
60. Баснакьян, И. А. Математическое описание основных кинетических закономерностей процесса культивирования микроорганизмов /

И. А. Баснакьян, В. В. Бирюков, Ю. М. Крылов // В кн.: Итоги науки и техники. Микробиология. Т. 5. Управляемое и непрерывное культивирование микроорганизмов. – М.: ВИНТИ, 1976. – С. 5 – 75.

61. Биореактор и другое оборудование для переработки навоза в биогаз: виды, принцип работы, популярные модели // RCYCLE.NET : [сайт]. – 2023. – URL: URL: <https://rcycle.net/navoz/oborudovanie-navoz/bioreaktor-i-drugie-ustanovki-dlya-pererabotki-v-biogaz> (дата обращения: 05.05.2023). – Текст: электронный

62. Каталог биогазового оборудования [Текст]. – Яранск: BioGas, 2022. – С. 3 – 5.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

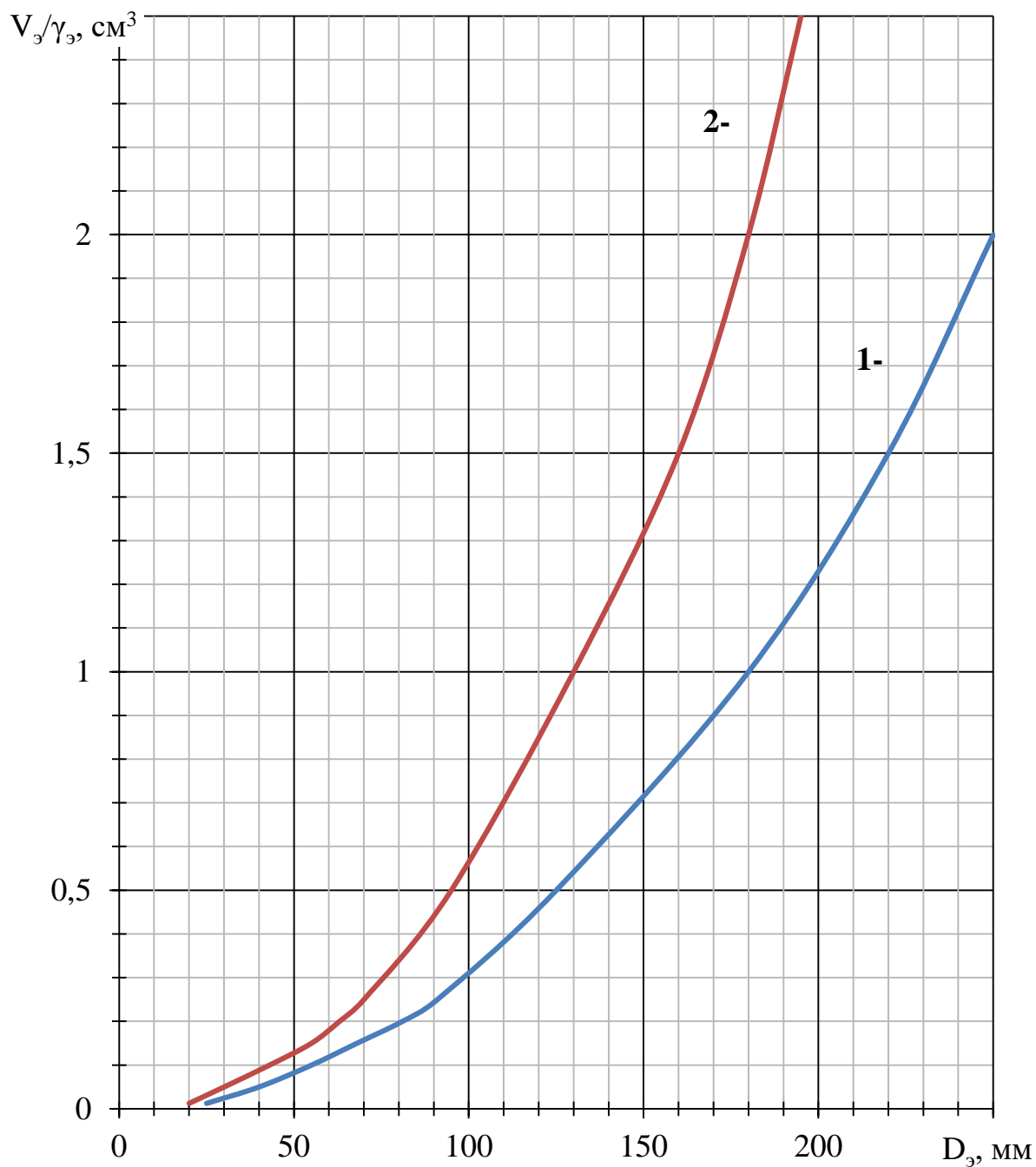


Рис. Номограмма для предварительного определения диаметра шнека:
1 – тихоходные шнеки; 2 – быстроходные шнеки

Таблица – Каталог одночервячных экструдеров

Марка экструдера *	Производи- тельность экструдера, кг/ч	Частота вращения шнека, об/мин (мин ⁻¹)	Установочная мощность, кВт		Площадь наружной поверхности экструдера, м ²
			двигателя	нагревате- лей	
ЧП 20x25	3–10	12,5–125 18–180 26–260	1,5	1,5	0,04
ЧП 32x25	5–25	11–106 14–140 21–212	6	3,6	0,09
ЧП 45x25	12–45	9–90 12–118 18–180	11	7,5	0,18
ЧП 63x25	20–80	7,5–75 10–100 15–150	25	14	0,35
ЧП 90x25	40–150	6–63 9–90 12,5–125	55	26	0,71
ЧП 125x25	95–280	4–43 6–63 8,5–85	100	50	1,37
ЧП 160x25	100–500	3–34 5–50 7–67	125	80	2,25
ЧП 200x25	250–800	3–27 4–40 5–53	200	120	3,52

*маркировка экструдера: ЧП – червячный пресс, первая цифра – диаметр шнека, вторая цифра – соотношение длины и диаметра

Приложение 3

Таблица – Формулы для расчета значений частных коэффициентов сопротивления и скорости сдвига для каналов простой конфигурации

Тип канала	Скорость сдвига, с ⁻¹	Частный коэффициент сопротивления, см ³
Цилиндрический	$\gamma_{\phi} = \frac{32 \cdot V_{\phi}}{\pi \cdot d^3}$, где d – диаметр канала, см; V _φ – производительность формирующей головки, см ³ /с;	$k = \frac{\pi d^4}{128L}$, L – длина канала, см.
Конический	$\gamma_{\phi} = \frac{256 \cdot V_{\phi}}{\pi \cdot (d_0 - d_1)^3}$, где d ₀ , d ₁ – диаметр конуса на входе и выходе, см.	$k = \frac{3\pi d_0 d_1^3}{128L(d_0^2 + d_0 d_1 + d_1^2)}$
Сужающийся (клиновидный)	$\gamma_{\phi} = \frac{11,2 \cdot V_{\phi}}{b \cdot (h_1 + h_2)^2}$, где h ₁ , h ₂ – толщина щели на входе и выходе, см; b – ширина канала, см.	$k = \frac{bh_1^2 h_2^2}{6L(h_1 + h_2)}$
Плоский щелевой	$\gamma_{\phi} = \frac{6 \cdot V_{\phi}}{b \cdot h^2}$, где b – ширина канала, см; h – толщина канала, см	$k = \frac{bh^3}{12L}$.

Приложение 4

Таблица – Каталог сепараторов

Параметр	Марка			
	СЦ-1,5	СЦ-1,5 И/П	СЦ-3А	МАВ 103
Производительность, м ³ /час	1,5	1,0-2,5	3,0	0,4-1,1
Частота вращения барабана, об/мин	6800	6700-7120	4500	8750
Объем грязевого пространства барабана, дм ³	1,7	1,7	5,4	0,56
Рабочее давление насоса, кгс/см ²	3,5	3,5	3,5	-
Длина ротора, м	1,87	1,02	1,1	0,701
Радиус ротора, мм	135	135	150	103
Мощность электродвигателя, кВт	3,0	2,8-3,2	4,0	0,7
Крупность разделения: по механическим загрязнениям, мкм	3			
по воде, мкм	1			

Таблица – Каталог биогазовых установок и комплексов [61, 62]

Марка	Вместимость, м ³	Производительность	
		по субстрату, т/сут	по биогазу, м ³ /сут
BioMash-20	8	0,3-0,9	-
БГР-12	12	0,5-0,9	20-40 (КРС) 40-80 (свиной)
БГР-15	15		
БГР-20	20		
БГР-25	25	0,9-1,3	50-80 (КРС) 100-180 (свиной)
БЭУ-35	36	до 2,4	до 500
БГР-50	53	1,5-2,2	90-150 (КРС) 170-320 (свиной)
БГУ-125	125	до 23	375

Учебное издание

**Васильева Елена Александровна
Шанова Ольга Александровна**

Технология обезвреживания и использования ОТХОДОВ

Учебно-методическое пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 11.09.2023 г. Рег. № 5019/23

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.