В. С. ВОЛОШИН

ОТХОДЫ
и
ТЕРМОДИНАМИКА

Київ
Маріуполь
2024

УДК 658.567:504.03
В 686

Рецензенты:

Гриценко Анатолий Владимирович, доктор географических наук, профессор, директор Украинского научно-исследовательского института проблем природопользования, заслуженный деятель науки и техники Украины

Коваленко Григорий Дмитриевич, доктор физико-математических наук, директор Института высоких энергий и ядерной физики ННЦ «Харьковский физико-технический институт», лауреат Государственной премии Украины.

Селиванов Станислав Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, вице-президент Украинского национального Отделения МАНЭБ.

Волошин В. С.
В 686 Отходы и их термодинамика. – Киев: ФОП Самченко А.М., 2024. 80 с.

ISBN 978-617-8413-06-4

В работе систематизированы основные материалы, отображающие причины и механизмы происхождения отходов в технологических процессах, связанные с термодинамикой и ее законами. Книга является эссеистическим последствием фундаментальной монографии автора «Отходы и их природа», изданной в 2024 году. В сжатом виде приводятся основные аргументы, доказывающие общность механизмов отходообразования для любых технологических процессов, и основанные на этом методы минимизации производственных отходов. Работа носит полемический характер и может быть основанием для обсуждения предложенных в ней идей, их развития или аргументированного опровержения. Книга рассчитана на научных работников, специалистов в области управления отходами, может быть полезна для студентов и аспирантов, просто любознательной молодежи, проявляющей интерес к основам точных наук и инженерии и склонной к аналитике.

© Волошин В. С. , 2024

Автор: Волошин Вячеслав Степанович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Украины, академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, почетный член академии экономических наук Украины и Международной кадровой академии, действительный член Нью-Йоркской академии наук. Область научных интересов – экология больших городов и промышленных регионов; проблемы сложных эколого-экономических систем; проблемы «черных песков» Приазовья; экология воды; природа происхождения отходов; аварийная диагностика технических систем. Автор и соавтор двадцати двух монографий и учебников по направлениям научно-педагогической и исследовательской деятельности.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 5

Глава 1. Предварение к излагаемому материалу 8

Глава 2. Актуализация второго начала термодинамики в современных областях знаний. 11

Глава 3. Влияние условий термодинамического неравновесия производственной системы на процессы отходообразования. Теоретический минимум отходообразования 22

Глава 4. Смысловое значение условия термодинамического неравновесия в технологических процессах 47

Глава 5. Минимизация отходообразования в источнике возникновения — современный вызов в технологических процессах. 51

Глава 6. Перспективы методологий минимизации отходов в источнике их возникновения. 59

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. 75

Литература. 79

Введение

Работа написана в стиле эссеистического исследования, посвященного монографии автора «Отходы и их природа», и дает возможность познакомиться в крайне сжатом виде с основными теоретическими и прикладными результатами, вошедшими в эту монографию.

Такой подход в изложении данной книги должен быть понятным для читателей: как для тех, кто познакомился с указанной выше монографией и имеет необходимость в более сжатом материале, так и для тех, кто впервые читает эту брошюру и имеет желание более широко ознакомиться с подробными материалами в основной монографии.

Отходы человеческой деятельности в качестве социальной проблемы давно вышли из детского возраста и стали объективной данностью для всего живого на земле. Трудно с этим не согласиться, зная масштабы загрязнения промышленными отходами в мире, классификацию их по степени опасности, не совсем эффективные и далеко не удовлетворяющие возможности для их минимизации путем переработки, утилизации и т. д. Эта увлекательная область знаний является не только познавательной, но, при определенных условиях, может принести обществу совершенно новые способы сосуществования с природой, новые принципы организации экономики, изменение отношений к правилам существования общества потребления и, в целом, новые правила жизни человека на этой планете.

В природе существует всего не более 5–6 реальных технологических процессов, находящихся в основе развития многообразия всех форм жизни на Земле. Например, фотосинтез, окисление и гниение, горение органики и др. И только человек, благодаря своему разуму, за всю свою историю создал более 300 тысяч искусственных технологических процессов, начиная от механической обработки камня до лазерных технологий, используя в качестве источника энергии неприемлемые для естественной природы ресурсы и способы их преобразования. Для этого вначале были интенсифицированы многие естественные процессы, а затем созданы такие, которых в принципе не существует в природе, и в особенности те, которые

однозначно ведут к истощению природных ресурсов и появлению самых неожиданных материалов и отходов. На протяжении многих веков самые искусные умельцы создавали не просто новую продукцию, материал, изделие, но придумывали совершенно уникальные последовательности действий, обрабатывали только им одним понятными способами сырье, используя при этом те энергетические ресурсы и те физические, химические и другие явления, которые на тот период были в их распоряжении.

Абсолютное большинство древних, и не только, технологий создавались в условиях недостаточности количества энергии. Поэтому, далеко не все используемое сырье подлежало правильной и нужной обработке. Даже технологии позднего средневековья были очень зависимы от имеющихся источников энергии — мускульной — человека и домашних животных, энергии воды и ветра, тепла. Только промышленная революция раскрепостила инженеров, дала в их руки последовательно новые источники энергии — паровую, химическую, электрическую, электромагнитную, ядерную и др.

На первый взгляд, это позволяло создавать технологии, в которых можно было одновременно использовать разные источники энергии. Но большинство создаваемых новых технологий XVIII–XX веков, по-прежнему, были рассчитаны только на тот источник энергии, который в силу известных физических и других законов позволял преобразовать лишь часть вводимого в технологию сырья в полезную продукцию. А остальное трансформированное, при помощи той же самой энергии, сырье шло в отход. Условная доминанта на все те же энергетические ограничения в технологиях осталась. Та же самая энергия, благодаря которой получали продукцию, использовалась и для того, чтобы в рамках того же самого технологического процесса изменить состояние той части сырья, которая безвозвратно уходила в отходы, как не имеющая потребительского значения. Такая технологически ограниченная идеология сохранялась на протяжении многих веков и существует сегодня, в самых современных технологических процессах и технологических укладах.

Сегодня можно утверждать, что *проблема отходов в глобальном практическом смысле вышла из подчинения человека и существует сама по себе с пониманием того, что мир уже никогда не будет*

таким, каким он был до научно-технической революции. Общество обречено жить в соседстве с накопленными за последние 150–200 лет отходами самого разного состава и опасности без существенных перспектив радикально исправить ситуацию до первоначального состояния.

При этом *к отходу чаще всего относятся как к свершившемуся факту,* с которым необходимо бороться, уменьшать количественно, изменять качественно, выделять, утилизировать, по возможности нейтрализовать. Ставятся и решаются задачи управления уже полученными отходами в направлении уменьшения наносимого вреда. Иными словами, человек чаще всего борется с отходами уже после образования, имея их как свершившуюся данность. Подобная инженерная и научная деятельность, как правило, осуществляется без наличия достоверных знаний о природе и механизмах собственно процесса образования отходов (процесса отходообразования). Отечественная и зарубежная научная литература представляет крайне мало достоверных сведений о закономерностях возникновения и механизмах развития отходов в производственных системах. И не последнюю роль в этих взаимоотношениях играет термодинамика любого технологического процесса. Условия энергетического воздействия на различные компоненты применяемого сырья всегда существенно разнятся и зависят от множества закономерностей физического, химического, биологического характера, в зависимости от направленности технологии, ее цели, то есть полезной продукции. Этим вопросам посвящена данная работа.

Глава 1.
Предварение к излагаемому материалу

Если мы хотим разобраться в появлении такого феномена, как природа происхождения отходов, который является массовым и общезначимым, мы должны принимать во внимание максимально возможные системообразующие явления, свойственные таким системам, как производственные, связанные с получением полезной продукции. К ним объективно должны относиться прежде всего, свойства сырья, которое принимает участие в данном технологическом процессе, а также свойства энергии, которая применяется там же. Не последнее место при этом занимают такие показатели, как состояние технической системы, предназначенной для обеспечения данного технологического процесса, а также сумма знаний и фактическая информация о естественно-научных основах искусственных материальных преобразований, заложенных в основе технологического процесса.

Основным источником отходов в любом технологическом процессе является безусловно его сырье. Подводимая энергия, топливо также являются источником отходов в виде продуктов сгорания или наиболее некачественных энергетических потерь, в основном, тепла. Но практика показывает, что основная масса отходов — это своеобразным образом переработанное сырье.

Чтобы понять смысл участия сырьевой базы в получении отходов, следует научиться структурировать эту базу по отдельным ее компонентам. Такими компонентами могут быть отдельные химические элементы и их соединения, части сырья, которые имеют локально обособленные физические или химические свойства, фракционный состав. Можно найти другие признаки, по которым следует производить компонентную структуризацию сырьевой базы конкретного технологического процесса. Например, это могут быть окислы металлов и других элементов в металлургической руде, могут быть отдельные химические реагенты, вступающие в реакции в технологиях химической или физико-химической переработки. Тканевое или синтетическое полотно, металлическая или деревянная заготовка для станочной обработки, собираемая злаковая продукция, структурированная по качеству зерна и стеблей злаков

в технологиях уборки зерновых и др. Все это можно рассматривать как структуру сырьевой базы любого технологического процесса.

Структурирование сырья по «компонентным ячейкам» позволяет выделять те из них, на которые целевым образом направлена действующая в системе энергия, определять особенности ее воздействия, ее термодинамические способности, фиксировать те трансформации, которые производит энергия с выделенными компонентами, чтобы превратить их в полезную продукцию. Из каких-то компонентов потом получается готовая продукция, а из каких-то — готовый отход. Поэтому структурирование сырья по компонентной системе является важным исходным звеном в понимании природы образования отходов в любом технологическом процессе.

Сырье не является самостоятельным субъектом для любого технологического процесса. Для изменения свойств сырья таким образом, чтобы приблизить их к свойствам запрограммированной продукции в данном технологическом процессе, необходимы силы, которые будут изменять эти свойства сырья и его компонентов. Источником этих сил в технологическом процессе является энергия определенного вида и качества, которая подводится к технической системе, обеспечивающей данный технологический процесс, таким образом, чтобы она только единственным запрограммированным образом влияла на сырье, и даже не на все сырье, а только на отдельные (нужные) его компоненты. Именно поэтому важно предварительное деление сырья на отдельные компоненты. Потому, что часть из них подлежит *запрограммированному* преобразованию под воздействием этой энергии. А остальные подлежат *незапрограммированному* воздействию той же самой энергии.

Кроме того, сырье — это не самодостаточный субъект, свойства которого во многом зависят от того, какими способами это сырье предполагается преобразовывать. Как правило, создатели технологии избирают эмпирическим путем тот способ преобразования сырья и тот источник энергии, которые, технологически оказываются наименее затратными для получения готовой продукции.

Именно поэтому как сырье, так и используемая энергия являются ключом к пониманию процессов происхождения отходов, в той же мере, в какой они отвечают за получение готового продукта, ради которого затеяна эта технология. И именно поэтому универсальные

причины происхождения отходов, как неизбежной составляющей любого без исключения технологического процесса, «как оборотная сторона медали», следует искать во взаимодействии массы сырья, сил, которые его преобразовывают, и энергии, которая является источником этих сил.

Понимание роли этих двух составляющих и их универсальное значение для любого технологического процесса являются основанием для последующих обобщений, которые позволяют вывести общие закономерности, лежащие в основе происхождения отходов, а значит, определять наиболее рациональные способы их минимизации и управления, что весьма актуально для современного общества.

Глава 2.
Актуализация второго начала термодинамики в современных областях знаний

Второе начало термодинамики носит неоспоримое и всеобщее мировоззренческое значение. И несмотря на то, что его действие относится к замкнутым термодинамическим системам, усилиями Р. Клаузиуса, Л. Больцмана, Дж. Гиббса, Р. Конна, И. Пригожина, П. Гленсдорфа, А. Колмогорова, С. Хокинга и др. оно не потеряло своего всеобщего значения и для термодинамически незамкнутых систем, становясь, таким образом, всеобщим законом.

За последние десятилетия этот закон использовался как объективное знание во многих областях науки и техники, подчас далеко выходящих за пределы классической термодинамики, там, где его применение было мало подходящим. Это вызывает скептическую реакцию со стороны ученых в области классической термодинамики, и тем не менее «экспансия» второго начала идет семимильными шагами.

Интерпретациям второго закона термодинамики посвящено множество работ. Энтропия-свойство, энтропия-вектор, энтропия-функция состояния, энтропия-параметр состояния. Эти определения кочуют по разным источникам, иногда расширяя смысловое содержание термина, иногда конкретизируя его под прикладные задачи [1, 2, 3, 4, 5], а иногда уводя в сторону от сути вопроса. Самый простой перечень определений, которые можно встретить в науке, может удивлять разнообразием. Энтропию можно понимать как:

– энтропия в классической термодинамике — это мера потери энергии в термодинамически замкнутой системе;

– энтропия Больцмана — это мера беспорядка, чем более беспорядочна микросистема, тем больше энтропии в макросистеме;

– энтропия Клаузиуса — энтропия может только увеличиваться или оставаться неизменной, если не совершается работа;

– энтропия Гиббса — потеря непрерывности, скачок энтропии при переходе от одинаковых газов к тождественным;

– энтропия Шеннона — это мера неизвестной информации или мера непредсказуемости;

– дифференциальная энтропия — формальный аналог понятия информационной энтропии Шеннона для случая непрерывной случайной величины;

– топологическая энтропия — мера сложности, как неотрицательное число, в теории динамических систем;

– энтропия Реньи — мера количественного разнообразия, неопределенности или случайности системы, определяется семейством функционалов;

– энтропия Колмогорова, и др.

В настоящее время непросто сформулировать некоторое обобщенное понятие для термина «энтропия» в естествознании. В термодинамике сплавов существует один подход к энтропии и свободной энергии, в химической кинетике и термодинамике — другой, в механике и тепловых процессах — третий, в классической энергоэнтропике — четвертый, в квантовой механике — взаимно противоположный и т. д. Полемики по этому вопросу добавила и неравновесная термодинамика. Если сюда еще добавить многочисленные существующие и не связанные между собой модификации понятия энтропии, как например, информационная энтропия, как мера качества информации в системе, социальная энтропия, как мера рассеяния активности в обществе, финансовая энтропия, как потеря информационного содержания бухгалтерской отчетности, энтропия Большого Взрыва и расширения Вселенной, как мера всеобщего рассеяния материи, энтропия звезд, и т. д., то возникает некоторая путаница, требующая расширенного осмысления этого термина.

Специалисты в области космологии и квантовой механики рассматривают энтропию, как меру неопределенности (хаотичности) системы, или то, что эквивалентно отсутствию знаний о ее точном состоянии. Иная интерпретация энтропии, как аналога площади «горизонта событий» на границе сингулярности «черной дыры», при условии, когда температура такой системы сопоставляется с гравитацией, дана Джейкобом Бекенштейном [6]. Кстати, именно статистическая характеристика энтропии «горизонта событий» в понимании содержания космической «черной дыры» позволила Стивену Хокингу впервые спрогнозировать такое уникальное явление, как слабое излучение «черной дыры», что, в принципе,

расширяет понимание энтропии, как физического параметра в природе, и подтверждает незыблемость второго начала.

Немецкий математик Д. Гильберт, ссылаясь на требования строгости к некоторым разделам классической физики, где используется теория вероятности, например, в термодинамике, считал, что настало время ее переосмысления в сторону большей конкретизации. Этому способствовало развитие направлений применения второго закона в смежных областях знаний. Гильберт не нашел решения этого вопроса, но поставленная задача дала толчок многим фундаментальным исследованиям в этой области.

В некотором прочтении, первоисточники классической термодинамики не предусмотрели строгой привязки энтропии к энергии [2, 5]. Словосочетания «Entropy» и «Energy» далеко не так коррелированы, как может показаться по Клаузиусу, который написал просто: «Слово «энтропия» я намеренно подобрал ближе к слову «энергия», так как обе, соответствующие этим выражениям величины настолько близки по своему смыслу, что они, по моему мнению, требуют однородного обозначения» [7]. Кстати, изначально энтропия обозначала «превращение» (греч. μετατροπή).

Нетрудно уследить за логикой Клаузиуса при выборе такого названия. Термин «энтропия» как бы семантически близок и созвучен с термином энергия и по форме, и по содержанию. Сюда же относятся такие термины, как эксергия, анергия, негэнтропия, каждое из которых существует в обороте энергоэнтропики в виде своего смыслового наполнения. И в своем значении, так или иначе, в них показывается связь с понятием энергии (табл. 2.1).

Первые три наименования, как производные от термина энергия, показывают степень ее направленности к усвоению системой. Четвертое и пятое наименования показывают взаимно противоположную направленность (векторное отображение) от термина энтропия.

Р. Кан в работе [8] попытался уточнить Клаузиуса и элегантно показал энергоэнтропийную связь между первым и вторым законами термодинамики. При постоянных T и P энтропия была введена в уравнение энергетического баланса через теплоту $\Delta Q = T\Delta S$ *так, что, при равенстве внутренней энергии* ΔU *и энтальпии* ΔH *из первого закона* $\Delta U + W = \Delta Q$ *, имеем* $W = \Delta Q - \Delta U = T\Delta S - \Delta H = -\Delta G$ *,*

где $-\Delta G$ — свободная энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал).

Таблица 2.1.— Смысловое содержание некоторых терминов, связанных с энергией и энтропией

№	Исходный термин	Корневое значение	Известная интерпретация термина
1	Энергия	Эрг	Степень возможной или реальной активности системы
2	Эксергия	Эрг	Максимальное значение энергии, которое может быть полезным образом использовано в системе
3	Анергия	Эрг	Часть внутренней энергии, которая никак не может быть преобразована в эксергию
4	Энтропия	Тропи	Мера невозвратной потери энергии, ее рассеяние, неупорядоченность
5	Негэнтропия	Тропи	Мера упорядоченности, организованность системы, противоположность энтропии

Канн указал на объективность энергетического содержания свободной энергии, а значит и энтропии. По крайней мере, для постоянных температур системы. Такая связь двух термодинамических законов дала основание для того, чтобы свойства энтропии были приравнены к свойствам энергии. В частных случаях, например, колебательная энтропия сопоставима с энергией через величину удельной теплоемкости, как показателя тепловой разупорядоченности, и играет роль «резервуара» для накопления энергии, но не более.

Если же принять точку зрения А. Коттрелла [9], представившего выражение энтропии $\Delta S = \Delta Q/T$ *«как систему с абсолютной температурой T, поглощающей бесконечно малую величину тепла и не имеющую при этом никаких других изменений»*, то напра-

шивается вывод: поглощение тепла без повышения температуры возможно только при увеличении емкости поглощающей системы, то есть ее средней теплоемкости. Здесь также энтропия квалифицируется как емкость для энергии. В работе [10] подчеркивается временная составляющая понятия энтропии, дающая возможности для обобщения термина. Встречаются исследования, которые ставят под сомнение собственно второе начало термодинамики [11, 15], правда, пока безуспешно.

Но «джин» из бутылки уже был выпущен.

Людвиг Больцман впервые назвал энтропию мерой хаоса. Мнение Шеннона о том, что должна существовать некоторая качественная мера информации, была поддержана Нейманом, который ввел для этого понятие информационной энтропии, как меры неопределенности или непредсказуемости в информации. В информатике энтропия постепенно стала синонимом меры неизвестности, мерой неожиданности, а в некотором смысле — мерой потери информации.

Это дало пищу для размышления и в других смежных областях знаний — философии, медицине, экономике, социологии, квантовой механике и др. Например, любое созидание — это уменьшение энтропии системы. Но для этого нужно прилагать дополнительные усилия, привлекать новую энергию и совершать новую работу. В этом заложена основа закона о прибавочной стоимости.

В особенности радикальными являются выводы о сущности энтропии в области космологии, пространства–времени, состояния и развития вселенной [12, 13].

Специалисты в области *IT*-технологий все активнее эксплуатируют связи понятия энтропии с информацией, опираясь на логический тезис об информации как мере упорядочения системы — чем больше информации о системе, тем более упорядоченной она является, тем меньше ее энтропия как мера рассеяния, и наоборот [14]. Пришелся ко двору закон К. Шенона (энтропия — мера информационной неопределенности или по-иному — прирост информации равен утраченной неопределенности $H = -\sum(p(x_i)\cdot\log_2 p(x_i))$, который хорошо корреспондируется с больцмановским статистическим выражением для энтропии смешения ($S_{\text{mix}} = k\cdot\ln W$, где W — количество распределений, принадлежащих системе при T_{const}), что дало пищу для огромного числа объективных исследований

как в области термодинамики, так и в области информатики. В конечном результате пришли к мнению, что закон Больцмана — это всего лишь частный случай закона Шеннона для предположения о равной вероятности всех равноправных микросостояний в составе некоторого макросостояния.

С благословения информатики, в других науках все чаще энтропию рассматривают как попытку описать какую-либо неизвестность.

Второй закон термодинамики в информатике постепенно стал получать поддержку и объяснения со стороны квантово-механической теории. Информационная сторона второго начала все более трактуется в виде квантовой проблемы, исключая при этом его вероятностные оценки. Специалисты по квантовой механике показывают, что увеличение энтропии — это не просто результат вероятностных изменений, а, по существу, следствие квантовых явлений, в частности, так называемой «квантовой запутанности»: что может происходить, а что — нет, в расчете на окружение системы. То есть, энтропия относится к логическим следствиям квантового ресурса информации [15]. Появилась одна из возможностей избавиться от громоздкой вероятностно-статистической системы оценки энтропии. Современная квантовая механика показывает, что в основе свойства квантовой запутанности системы с внешним окружением лежит следующее фундаментальное качество (оно верно и для макросистем). *Уменьшение энтропии системы должно происходить только за счет роста энтропии внешнего окружения таким образом, чтобы сумма этих двух энтропий увеличивалась или оставалась неизменной*. Правда, в этом определении есть небольшое уточнение, которое требует иного взгляда на энергетические соотношения в системе и в ее надсистеме. Энергетически они должны быть несопоставимыми: энергия, которой обладает донорская или внешняя надсистема должна значительно превышать энергии своей подсистемы.

Квантовая версия термодинамики оказалась весьма плодотворной с точки зрения расширения ее претензий на другие области знаний. Это так называемые «ресурсные теории», в которых идет речь о том, какие преобразования возможны, а какие — нет в условиях необратимости процессов. Здесь, например, уместна ссылка на работы ученых из Оксфорда Дэвида Дойча и Кьяра Марлетто, которые разрабатывают так называемую «теорию конструктора». В ней они делают попытку

формировать мир, в котором вероятности и случайности в физическом мире просто отсутствуют, в том числе, и в понятии энтропии. Цель этой теории — установить, какие события могут происходить с учетом условий среды окружения, а какие — нет. Авторы делят события на реальные и полностью исключаемые в зависимости от условий внешней среды. В существе теории понимание того, что в основе всех физических категорий лежат возможные и невозможные преобразования, которые в условиях необратимости приобретают объективный смысл, в виде «кирпичиков» мироздания.

Управлению энтропией в учетных системах посвящены и труды финансистов [16, 17, 18]. Здесь в качестве энтропии системы принимают, например, потерю информативности в финансовой отчетности, понимая под этим финансовые утраты, связанные с информационными деформациями в системах учета. Управление энтропийным уровнем принимается как обеспечение устойчивости учетной системы.

В основе приложения энтропии в гуманитарной сфере предполагаются объективные противоречия в общественных отношениях. Объективная данность энтропии — ее однонаправленность играет сегодня большую роль и в философских спорах о «стреле времени», о пассионарности общества, о соотношении целого и частного, среди политологов — в вопросах о неизбежности нарушения равновесных состояний в обществе и даже в законотворчестве, как основании для минимизации роста энтропии таких систем [19, 20]. В лингвистике это мера недостаточности объема информации в сообщении в виде символов, знаков алфавитов. Психологи применяют аналоги понятия энтропии для определения возможностей мозга справляться с существующим объемом хаоса, как меры стабильности психики в условиях неопределенности. Все это остается для критического обсуждения.

Энтропия в любой системе спонтанно стремится к росту. Это непреложный закон Природы. Если не прилагать внешних усилий, то поле зарастет сорняками, дом или город будут постепенно разрушаться, если не повторять прочитанное, оно скоро забудется. Для разрушения нужно значительно меньше затрат энергии, работы, чем для созидания. Мир не может не подчиняться второму началу термодинамики. Но мир и не может не развиваться, в основе чего лежат процессы минимизации энтропии.

Патриарх неравновесной термодинамики И. Р. Пригожин в своей Нобелевской речи и в последующих работах подчеркивает широту области притязания, относящейся к понятию энтропии незамкнутых систем и призывает не отказываться от более широкого ее толкования. Плодотворное понимание неравновесности систем может иметь огромное количество трактований для самых различных объектов исследования. Если при этом соблюдается условие незамкнутости системы, то понятие термодинамического неравновесия получает большую поддержку и среди не строго термодинамических систем в некоторой специфической их формулировке.

В этих выражениях скрыт достаточно глубокий смысл, примиряющий противоречия между теориями неуклонного роста суммарной энтропии, тепловой смертью Вселенной, с одной стороны, и фактами биологического развития, синергетическими процессами в самых различных системах, способностями к самоорганизации там, где, на первый взгляд, должны преобладать процессы рассеяния и разрушения, если их оценивать с позиций замкнутых термодинамических систем. История науки сумела развернуть второй закон термодинамики лицом в сторону огромного количества самых разнообразных систем (замкнутых, разомкнутых, равновесных или неравновесных, обратимых или необратимых) и примирить связанные с ним многие противоречия.

Сошлемся на слова Стивена Пинкера: «Почему второй закон внушает страх? Он определяет конечную цель для жизни, разума, и человеческих стремлений привести в действие энергию и информацию, чтобы сдержать волну энтропии и создать убежище для порядка. Недооценка тенденций к беспорядку и неспособность ценить долгожданные наши порядки, которые мы создаем, являются основным источником человеческой глупости».

Такие формулировки и определения, при безусловной их логике, обладают некоторыми противоречивыми толкованиями, что удаляет их от научного понимания предмета исследования. Отнесем к произвольным (а иногда и не строгим) толкованиям второго начала термодинамики для замкнутых (и не только) систем следующие:

– энергия распространяется от более теплого объекта к более холодному, но не наоборот;

– теплота не может переходить самопроизвольно от холодного тела к более теплому;

– конечная энтропия должна быть не меньше исходной;

– чем больше энергии переводится в энтропию, тем меньше ее остается для выполнения работы;

– энтропия выступает как мера неопределенности (неупорядоченности) или сложности системы;

– энтропия как степень беспорядка или хаоса во вселенной;

– энтропия как мера беспорядка либо остается неизменной, либо возрастает;

– энтропия как мера необратимости процесса в замкнутой системе;

– энтропия системы возрастает с уменьшением ее информативности и наоборот;

– энтропия как информационная (энергетическая) емкость системы;

– энтропия, как мера беспорядки в психологии, обществе, экономике, с привязкой к специальной терминологии;

– энтропия как мера неожиданности.

В разных системах энтропия приравнивается к недостоверной информации, ее потере, снижению социальной активности и усугублению производительного потенциала в обществе, уменьшению активности (оборачиваемости) денежной массы и др. В некоторых работах энергия образно и произвольно приравнивается к пассионарности в обществе, его производительным показателям, к объемам информации, количеству денег и другим емкостным и потенциальным характеристикам в самых различных областях знаний. Безусловно, многие из таких показателей несут умозрительное, иногда не вербализованное содержание и только качественно могут претендовать на закономерности, отображающие второе начало термодинамики. Например, известная формулировка Л. Бриллюэна о математической связи информации и энтропии действует лишь на микроинформационном уровне, который относится к молекулярным процессам. Для уровня макроинформации распространения формулы Бриллюэна не существует. Тем не менее, такая ошибка принята как данность во многих философских суждениях.

В целом, возможно, энтропии и не повезло, что ее рождение, как термина научного содержания, стало производной именно от тепловых процессов в замкнутых системах и от термодинамики, не умаляя заслуг последней. Но это изначально ограничило ее притязания. Если бы энтропия как понятие появилась из области информатики либо из области космологических наук, ее содержание сегодня было бы более красочным и многообразным, возможно и ее судьба как научного термина была бы иной. Но история распорядилась так, как распорядилась, и направление развития этого понятия есть и будет поступательным и целенаправленным, как это полагается всем масштабным научным явлениям.

В связи с этим попробуем «легализовать» некоторые варианты применения второго начала к не физическим и не замкнутым системам. Прежде всего, мы должны согласиться с тем, что подобная научная вольность в любой области знаний (например, [20]), чаще всего, приводит к следующему:

– теряется строгость изложения материала;

– далеко не всегда сохраняется формализованный математический аппарат термодинамики;

– смысловое наполнение второго начала приобретает иную окраску, часто далекую от классических интерпретаций;

– появляются новые зависимости, отражающие смысл рассматриваемых не термодинамических систем;

– энтропия перестает быть свойством системы и выступает как ее параметр;

– «энергия» такой системы приобретает новые качества. Это может быть потенциал, деньги, пассионарность общества.

Поэтому многие исследования в этих областях, претендуя на объективность, в лучшем случае дают качественную картину, которая далеко не всегда может отличаться точностью изложения, а иногда и его достоверностью.

Возникает вопрос. Как в этом ключе можно рассматривать отходообразующие производственные системы и их отношение к термодинамическим процессам?

Производственные системы относятся, прежде всего, к неравновесным, не замкнутым и изменяющимся во времени системам. Их сущностью является присутствие самых различных градиентов

среди управляющих параметров, благодаря которым происходит целенаправленное, изменяющееся во времени, воздействие на одни, сырьевые, материалы, и при этом получаются совершенно другие, новые предметы и материалы, часть из которых представляет интерес для их создателя — человека, это продукция, а часть оказывается ненужной, это отход. В незамкнутых производственных системах, отвечающих за получение отходов, проявляются качества необратимости, появляются условия для баланса между равновесием и неравновесием в отдельных частях системы и в самых различных параметрических состояниях. То есть термодинамическое начало в системах производства полезной продукции объективно присутствует.

Чаще всего, существующие производственные системы в своей основе содержат тепловую, механическую или электрическую энергию, часто это энергия физико-химических процессов. Безусловно, применяются и многие другие источники энергии. Мы назвали только наиболее типичные из них. Такие системы оказываются весьма адаптированными к основным правилам классической термодинамики.

Исторические корни второго начала термодинамики относятся к энергетическим процессам, которые использовались во многих производственных системах и относились, прежде всего, к способу преобразования тепловой энергии в движение. Это тепловые машины, паровые двигатели. Сама формула теоремы Карно подсказывает, что в основе любого теплового воздействия лежит разность температур, отражающая энергетическую динамику процесса, а значит — соотношение полезной и бесполезно теряемой энергии, которая, в нашем случае — производстве, принимает участие в получении полезного продукта и появлении отхода — это основа любого технологического процесса. Такое поведение любой производственной системы показывает ее отношение к неравновесности, необратимости и динамизму, что является сущностью второго начала термодинамики для незамкнутых систем.

Поэтому вопрос применения второго начала термодинамики к процессам отходообразования, независимо от их сущности, есть объективная реальность и является актуальным.

Глава 3.
Влияние условий термодинамического неравновесия производственной системы на процессы отходообразования. Теоретический минимум отходообразования.

Термодинамические процессы в широком смысле можно разделить на три неравнозначных области. К первой относится небольшая группа идеальных процессов, для которых основное отличие — стационарность, равновесность в замкнутых системах и стремление к максимуму энтропии. В развитие идей Ларса Онсагера [1, 2, 3] появилась теория линейной термодинамики, объектом которой становятся системы в окрестностях равновесия, так называемые слабо неравновесные термодинамические системы. К ним относятся системы, где термодинамическое неравновесное взаимодействие невелико и материальные потоки линейно зависят от порождающих их термодинамических сил. К третьей группе, которая изучается нелинейной термодинамикой [1], относятся сильно неравновесные термодинамические процессы. Основная их особенность заключается в явно нелинейной зависимости материальных потоков от порождающих их сил и стремлении к самоорганизации, минимуму диссипации.

В основе макроскопического расчета производства энтропии для слабо неравновесных систем находится условие, при котором в бесконечно малом объеме производственной среды в каждый заданный момент времени удерживается состояние локального равновесия. В этом случае энтропия и ее производные могут быть рассмотрены как функции тех же локальных переменных, что и равновесная система. И. Р. Пригожин показывает, что подобные отношения имеют право на существование, а предположение о локальном равновесии будет уместно, по крайней мере, для явлений переноса не слишком быстрых химических реакций, многих других энергетических взаимодействий, подчеркивая роль диссипативных процессов даже в таких неравновесных, но приближенных к равновесию системах. Переход от систем с слабо выраженной неравновесностью к системам с явно выраженной неравновесностью в каждом случае имеет свои индивидуальные особенности, которые позволяют отыскивать, по крайней мере, аналитическим способом, отличия между ними.

Обратимся к одной из таких систем и рассмотрим структуру уравнения баланса энтропии [4, 5]. Для его выведения используется уравнение Гиббса для полного дифференциала энтропии на единицу массы $T\,\delta S = \delta e + \rho\delta v - \sum_{\gamma}\mu_{\gamma}\frac{\mathrm{d}N_{\gamma}}{\mathrm{d}t}$. Исходными данными являются уравнение баланса массы в его классической форме $\sum_{\gamma=1}^{n}\sum_{\rho=1}^{r} n_{\gamma\rho}\,M_{\gamma}\,w_{\rho} = \sigma[M] = 0$ и уравнение баланса $\sum_{\gamma=1}^{n} F_{\gamma i}\,\rho_{\gamma}\Delta_{\gamma i} - P_{ij}\,v_{ij} = \partial_i(\rho e) + \left[W_j + \rho e v_j\right]$ внутренней энергии процесса. Здесь $\gamma = 1,1$, n — введенное нами число компонент производственной среды (под этим показателем мы можем рассматривать не только обобщенные материальные и энергетические компоненты системы, но и некоторые другие их составляющие, в зависимости от поставленных задач, о чем будет сказано ниже); μ_{γ} — значение химического или эквивалентного ему потенциала каждой компоненты на единицу массы; $N\gamma$ — массовая концентрация компоненты γ; ν_{γ} — макроскопическая скорость переноса компоненты γ; ρ_{γ} — парциальная плотность компоненты γ; $M\gamma$ — молярная масса компоненты γ; Δ_{γ} — диффузионный поток компоненты γ; F_i — компонента внешней силы на единицу массы; P_i — компонента тензора давления внешней силы на единицу массы; w — скорость химической реакции в молях в единицу времени; e — плотность энергии на единицу массы.

Пока без обобщения уравнения Гиббса на другие системы (нас интересует только качественная сторона состояния системы), и без общего вывода запишем выражение для расчета производства энтропии в таких системах:

$$\sigma[S] = \frac{W_j}{T_{j'}} - \sum_{\gamma}(\rho_{\gamma}\Delta_{\gamma})[(\frac{\mu_{\gamma}}{T})_{j'} - \frac{F_{\gamma j}}{T}] - \frac{p_{ij}}{T}n_{ij'} + \sum_{\gamma}\frac{w_{\rho}\,A_{\rho}}{T} \geq 0. \quad (3.1)$$

Уравнение баланса энтропии можно записать в следующем виде:

$$\sigma[S] = \frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \mathrm{div}\,J \geq 0\,. \quad (3.2)$$

Здесь $\sigma[S]$ — производство энтропии в единицу времени и на единицу объема (силовая характеристика источника энтропии);

$J = \frac{W}{T} - \sum_{\gamma}(\rho_{\gamma}\Delta_{\gamma})(\frac{\mu_{\gamma}}{T}) + \rho s v$ — поток энтропии в слабо неравновесной системе. Баланс энтропии в слабо неравновесной системе становится возможным потому, что разделение энтропии на поток и силу позволяет утверждать об управляемости производством энтропии и его минимизации.

Для сравнения запишем показанное в [1] уравнение баланса для избыточной энтропии при малых возмущениях для сильно неравновесных систем.

$$\frac{1}{2}\frac{\partial[\delta^2(\rho z)]}{\partial t} = \sigma[\delta Z] - \{\frac{\delta W_j}{\delta T} + v_j\delta^2(\rho s) -$$

$$-\sum_{\gamma}\delta(\rho_{\gamma}\Delta_{\gamma j})\delta(\frac{\mu_{\gamma}}{T}) - \frac{1}{T}[\delta P_{ij}\,\delta v_i + \frac{1}{2}\rho v_j(\delta v)^2]\}. \qquad (3.3)$$

Источник силы, вызывающей избыточную энтропию в сильно неравновесной системе, определяется выражением

$$\sigma(\delta Z) = \delta\sum_{\alpha} X_{\alpha} T_{\alpha} - \frac{1}{T}[\delta(\rho e)\delta v_j + \delta P_{ij}\,\delta v_i + \frac{1}{2}\rho v_j(\delta v)^2] -$$

$$-\sum_{\gamma}\delta\rho_{\gamma}\delta v_j[\frac{F_{\gamma j}}{T} - (\frac{\mu_{\gamma}}{T})_j] - [\frac{\delta P_{ij}}{\delta T} - \frac{\delta(\rho v_j)\delta v_i}{T}]v_{ij} +$$

$$+\frac{1}{2}\frac{(\delta v)^2(\rho v)_j}{T} + [\frac{\delta(\rho e)}{\delta T} - \sum_{\gamma}\delta\rho_{\gamma}\delta(\frac{\mu_{\gamma}}{T})_j]v_j. \qquad (3.4)$$

При этом отношения $\delta^2 Z < 0$ и $\frac{\partial(\delta^2 Z)}{\partial t} \geq 0$ отражают общее и достаточное условие термодинамической устойчивости явно неравновесной системы. Таким образом, показана связь источника избыточной энтропии с показателем термодинамической устойчивости системы.

Рассмотрим в качестве термодинамической системы некоторый производственный процесс, связанный с технологией получения полезной продукции и одновременным образованием определенной

номенклатуры отходов. Сразу оговоримся, что наша производственная система не является замкнутой, является частью некоторой более общей надсистемы, самостоятельно может относиться к термодинамически неравновесным системам с различной степенью неравновесности для отдельных ее частей. Иными словами, в такой реальной системе можно ожидать проявления как линейных, так и нелинейных термодинамических процессов.

Мы вправе рассматривать производство, его технологию как один из способов организации системы получения товарной продукции, учитывая при этом диссипативные механизмы. Любой *технологический процесс можно представить как организованную человеком, упорядоченную последовательность некоторых физических, химических и др. явлений, осуществляемых при помощи искусственно созданных технических систем, в результате которых осуществляется организованное преобразование части сырья в продукцию с заранее заданными свойствами*. Но при этом **продукция — это результат упорядоченной последовательности действий** с заранее заданным результатом и минимумом затрат, в том числе — энергетических. **Отходы же производства могут получаться в результате неупорядоченных воздействий** тех же самых явлений, той же самой энергии и той же самой технической системы **на вторую часть сырьевых компонентов в условиях, не предусмотренных данной технологией**. Справедлив тезис: производство — только для продукции; производство — не для отходов.

Это означает, что производство полезной продукции, как организованной составляющей результативности системы, целенаправленно связано с функционированием той ее части, которая должна обладать свойствами сильной термодинамической неравновесности. Эта часть системы, в конечном результате, обладает способностью к достижению некоторого минимума энтропии. И напротив, та часть системы, которая отвечает за получение отхода (это нецеленаправленная и неорганизованная часть результативности системы), является менее упорядоченной, стремящейся к росту энтропии и обладает свойствами слабой неравновесности либо вообще изначально находится в состоянии термодинамического равновесия по отношению к воздействующей на нее энергии.

Здесь может идти речь о свойстве **термодинамического двуединства производственной системы**. *Когда одна и та же производственная система по отношению к определенной части компонентов сырья проявляет себя как сильно неравновесная система и функционирует по законам нелинейной термодинамики и, одновременно, по отношению к другой части сырья проявляется как слабо неравновесная, либо находящаяся в состоянии термодинамического равновесия, и подчиняется законам линейной термодинамики.*

Для такого термодинамического двуединства производства продукции и отходов мы вправе отметить наличие наложения этих двух, чаще всего стационарных, но необратимых процессов (рис. 3.1). Это положение полностью соответствует третьему закону энергоэнтропии [5], показывающему, что энтропия открытых систем может уменьшаться за счет потребления энергии от внешних источников и перераспределения ее между системой и внешней средой в пользу первой. Этот вывод следует и из обобщающих исследований в области квантового мировоззрения, в частности, из теории квантовой запутанности, как альтернативы вероятностным методам в термодинамике [6], но последнее доказательно только на микроуровне.

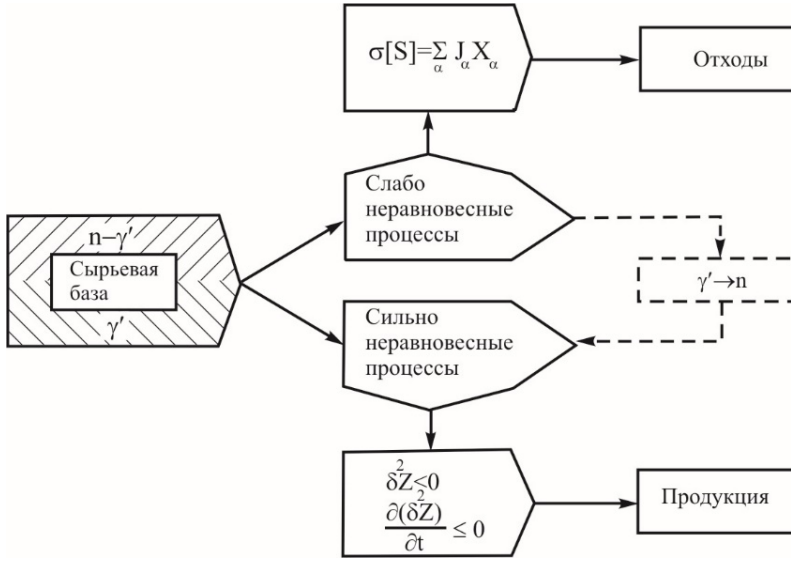


Рисунок 3.1 — Схема реализации термодинамического двуединства в производственной системе

В этом смысле производство продукции связано со стабильно предсказуемым поведением системы, стремящейся к минимально возможному уровню активности, совместимому с питающими потоками сырья и энергии. Производство выступает как двуединая система, имеющая отличительные свойства из тех, которые применяются для преобразования сырья в готовую продукцию и, которые применяются для образования отходов. Основные отличия, отражающие это двуединство производственной системы, приведены в табл. 3.1.

Производственную систему можно функционально разделить на две взаимно дополняющие составляющие. Идеология первой из них формулируется так: *нечто нужно преобразовать необходимым образом, при помощи имеющейся энергии, чтобы получилось то, что запланировано. Это должна быть готовая продукция, ради которой создан этот процесс*.

Идеология второй составляющей выражается таким образом: *нечто может быть получено без заданной программы, так как получается произвольно в условиях существующей технологии. Это будет отход.*

Напрашивается естественный вывод. Если мы стремимся к теоретическому минимуму отходов, который обусловлен только естественными условиями самого технологического процесса и относится к переработке всего сырья необходимыми для этого источниками энергии, то для его получения система в той ее части, которая осуществляет отходообразование, должна также стремиться в сторону сильного термодинамического неравновесия. И, наоборот, система способная к произвольным энергетическим преобразованиям технологического сырья, которое потом уходит в отход, должна иметь вектор направленности в сторону термодинамического равновесия.

Обратим внимание на то, что любой технологический процесс, являясь термодинамически неравновесным, чаще всего находится в состоянии стационарности по отношению к материальным потокам. Такую систему можно описать следующим образом. Если в составе сырья, используемого в системе, имеется $\gamma = 1{,}1$, n компонентов, из которых γ' участвуют в получении полезной продукции, то оставшаяся часть $(n - \gamma')$ в получении отхода.

Таблица 3.1 — Отличительные термодинамические свойства системы относительно ее производственной результативности (по данным работы [7])

Производство продукции	Получение отхода
1	2
Область исследований описывается закономерностями неравновесной термодинамики. Сильно неравновесная система	Область исследования описывается законами линейной неравновесной термодинамики. Слабо неравновесная система
Материальным потоком является частично организованная часть компонентов сырьевой базы	Материальным потоком является неорганизованная часть компонентов сырья
Производя продукцию, система должна находиться в области сильно неравновесного термодинамического состояния	Получая отход, система (или часть ее, отвечающая за образование отхода) должна находиться в слабо неравновесном состоянии с минимумом диссипации, описываемом законами линейной термодинамики
Отсутствие диссипативных структур как источника самоорганизации системы	Производство энтропии, совместимое с граничными условиями, налагаемыми на систему в сторону ее равновесного состояния
Нарушается тенденция к «забыванию» начальных условий. Система не спешит к общему выравниванию свойств в собственной структуре	Система «забывает» начальные условия и зависит от граничных условий существования. Система склонна к равным свойствам ее частей
Стабильность и предсказуемость поведения системы совместимы с сырьевыми потоками	Внешняя зависимость поведения системы. Поведение системы, не совместимое с частью сырьевого потока вызывает его отторжение
Зависимость производства энтропии от времени. В сильно неравновесной системе поступающий из окружающей среды и изменяющийся во времени поток энергии или вещества определяет отрицательный поток энтропии dS_e, который компенсируется производством энтропии	Энтропия не зависит от времени. $dS = dS_e + dS_i = 0$. В слабо неравновесном состоянии стационарной системы подразумевается неизменность материальных потоков во времени. Производство энтропии существует только в ограниченной области неравновесия.

Закінчення табл. 3.1

1	2
dS_i из-за необратимых процессов внутри системы ($dS_e = - dS_i < 0$). Отрицательный поток dS_e означает, что в этом случае система поставляет энтропию в окружающую среду. Это значит, что в стационарном состоянии активность системы способствует непрерывному увеличению энтропии в окружающей среде	Особенность заключается в том, что при производстве отходов система способна долгое время находиться в слабо неравновесном состоянии и быть там достаточно устойчивой
Стационарное состояние системы неоднозначно реагирует на многообразие флуктуаций, создаваемых системой или окружающей средой	Стационарное состояние системы заведомо является слабо неравновесным. Система находится в окрестностях равновесия
Увеличение энтропии о.с. настолько мало, насколько это позволяют наложенные на систему граничные условия, (т.е. условия конкретного технологического процесса или другие способы организации системы (принцип минимума роста энтропии)	Диссипативные процессы, связанные с производством отходов, получают развитие по мере приближения системы к равновесному состоянию

Это означает, что некоторые $(n-\gamma')$ -й компоненты сырья, поступающего в систему из внешней среды, после соответствующих воздействий и преобразований переходят в состояние отхода и вновь возвращаются во внешнюю среду. Стационарное состояние появляется в том случае, если поток по второй группе компонентов не изменяется во времени. Такое условие связано с соблюдением определенных соотношений между скоростями основных реакций, взаимодействий и других процессов.

Здесь уместно рассмотреть условия выполнения теоремы о минимуме производства энтропии в слабо неравновесных системах [8, 9].

Обобщая термодинамические силы X_α и потоки J_α в слабо равновесных системах, локальное производство энтропии можно записать как

$$\sigma[S] = \sum_{\alpha} J_{\alpha} X_{\alpha} . \qquad (3.5)$$

Здесь и в дальнейших исследованиях под термодинамическими силами X_{α} следует понимать, в частности, одну из следующих производных для силовых параметров, относящихся к конкретной технической системе:

– скорость химической реакции;
– сила электрического тока;
– скорость переноса электрических зарядов;
– скорость массопереноса;
– скорость диффузии;
– скорость движения жидкой или газовой среды;
– скорость движения материальной точки;
– скорость горения;
– скорость фазовых превращений или переходов, и др.

Причем соотношение между силами и потоками должно носить линейный характер посредством феноменологических коэффициентов L_{ij} таким образом, что $J_i = \sum_j L_{ij} X_j$. Для самого общего случая, когда имеется перенос вещества (m) и энергии (e) в материальных потоках (J) при помощи создающих их сил (X), локальное производство энтропии можно представить следующим образом:

$$\sigma[S] = J_m X_m + J_e X_e > 0 . \qquad (3.6)$$

При этом феноменологические уравнения Онсагера имеют вид

$$J_m = L_{mm} X_m + L_{me} X_e = 0 , \qquad (3.7)$$

$$J_e = L_{em} X_m + L_{ee} X_e . \qquad (3.8)$$

Первое соотношение принимается равным нулю, исходя из тех условий, когда поток вещества в стационарной неравновесной системе в диапазоне малых приращений отсутствует. Далее, принимая во внимание теорему взаимности Онсагера, согласно которой $L_{me} = L_{em}$, выразим

$$\sigma[S] = L_{mm} X_m^2 + 2 L_{me} X_m X_e + L_{ee} X_e^2 . \qquad (3.9)$$

Первая производная выражения (3.9) по X_m при неизменяющемся значении X_e дает выражение

$$\frac{\partial(\sigma[S])}{\partial X_m} = 2(L_{me}X_e + L_{mm}X_m) = 2J_m = 0\,. \qquad (3.10)$$

Таким образом, для указанных соотношений выражения абсолютно равнозначны.

Дополнительно обратимся к известной *S*-теореме Ю. Л. Климонтовича. Ее смысл заключается в том, что при постепенном удалении системы с условно принятыми нулевыми управляющими параметрами от равновесного состояния, в случае дальнейшего изменения этих параметров от нулевого значения, энтропия системы, приведенная к заданному значению средней энергии, уменьшается. Это означает, что такая система изменяется в сторону большей организованности. По-видимому, правильно будет говорить о том, что более организованная система готова давать более системный результат (например, производить более качественную продукцию) или же давать меньше неорганизованного результата. К такому результату можно отнести и уменьшение потерь (отходов) системы.

Правомочным является вопрос: можно ли отыскать условия, при которых система будет давать теоретически обоснованный минимум отходов? И от чего этот теоретический минимум будет зависеть? Решение такой задачи может стать весьма плодотворным для наших исследований.

Безусловно, для отходообразующей производственной системы необходимым условием теоретического минимума отходов, в частном виде, согласно формуле (3.4), является соотношение $\sigma\left[\delta Z\right] = 0$, при котором в балансе (3.3) избыточная энтропия не увеличивается, т. е.

$$\delta\sum_{\alpha} X_\alpha T_\alpha + \left[\frac{\delta(\rho e)}{\delta T} - \sum_{\gamma}\delta\rho_\gamma\delta(\frac{\mu_\gamma}{T})_j\right]v_j = \frac{\delta v_j}{T}\left[\delta(\rho e) + \delta P_{ij}\right] +$$

$$+\frac{1}{T}\sum_{\gamma}\delta\rho_\gamma\delta v_j\left[F_{\gamma j} - \mu_{\gamma j}\right] + \left[\frac{\delta P_{ij}}{\delta T} - \frac{\delta(\rho v_j)\delta v_i}{T}\right]v_{ij}\,. \qquad (3.11)$$

Для простоты анализа уберем члены с двойными приращениями, как бесконечно малые, и умножим каждый из оставшихся членов на δT. Полученное выражение

$$\delta(\rho e) = \delta P_{ij} \frac{v_{ij}}{v_i} \tag{3.12}$$

дает возможность в самых общих чертах оценить, по-видимому, одно из частных достаточных условий минимума энтропии для производственной системы с учетом свойства ее термодинамического двуединства. В его основе — равенство источников сил для увеличения избытка энтропии в неизолированной сильнонеравновесной системе. Справа — бесконечно малое приращение тензора давления в направлении вектора приложения силы *ij*, а слева — бесконечно малое приращение источника плотности энергии на единицу массы, но в направлении вектора *i*. Учитывая, что производство продукции, как организованный процесс в сильно неравновесной системе, создает минимально возможный прирост энтропии, примем условие, что все остальное увеличение избытка энтропии в такой термодинамически двуединой системе связано именно с получением отходов. Поэтому выражение (3.12) применимо для достаточности оценки теоретического минимума отходообразования в производственной системе определенного характера.

Не будем пока делать далеко идущие обобщения из этих частных определений.

Тем не менее, важным выводом здесь является то, что это условие выполняется только при неизменных во времени потоках (их нет в формуле приращений), а значит, должно проявляться только в производственных системах в их стационарных состояниях. При этом должно выполняться условие v_i = const. Изменение направления вектора сил в системе выполняется только в соответствии с направлением свободного вектора *j* соответствующего тензора. Поэтому переменной величиной, влияющей на минимум отходообразования, здесь можно считать также вектор скорости прироста условного давления (напора), как типичного источника динамического усилия в направлении свободного вектора. И значит, справедлива частная функция $\delta(\rho e) = f(\delta P_j, v_j)$. Поскольку баланс избыточной энтропии может быть определен только для условий динамического равновесия в диапазоне малых приращений δ, то условие (3.12) может быть частным решением проблемы поиска минимума отходообразования.

В данном случае для нас важна тенденция к получению некоторого предельного результата, а именно, минимально возможного объема отходов, который будет связан с конкретным технологическим процессом, с его конкретной энергетикой и вполне определенной сырьевой структурой.

На практике мы чаще имеем дело с потоками, которые заданы линейными зависимостями. Однако при этом только часть сил (X_i'), существующих в системе и ответственных за *i*-ю компонентность продуктообр азующего сырья, связана с сильной неравновесностью, т.е. с производством полезной продукции. Другая часть сил (обозначим как X_j''), которые связаны с линейными процессами вблизи равновесия, относится к преобразованию той составляющей *j* в структуре сырья, которая направляется в отходы. Попробуем ввести в выражение для производства энтропии, которое, по сути, является инвариантным для физических явлений, весовой коэффициент $\lambda = \dfrac{X_i'}{X_i}$ независимо от индекса силы. Одновременно получаем $1-\lambda = \dfrac{X_j''}{X_j}$. Тогда

$$\sigma[S] = \sum_i J_i X_i = \sum_{ij} L_{ij} X_i' X_j'' = \lambda(1-\lambda)\sum_{ij} L_{ij} X_i X_j \qquad (3.13)$$

и соотношение $\dfrac{\partial(\sigma[S])}{\partial X} = 0$ также фактически повторяет выражение (3.10). Из изложенного следует вывод о том, что если производственная отходообразующая система не имеет дополнительных ограничений, то она стремится к минимуму энтропии при условии создания механизмов отклонения системы в сторону сильной неравновесности. При этом инвариантность в рассуждениях о функции λ остается. Чем больше значение весовой функции λ, тем далее от равновесного состояния находится система. И наоборот. Сущность условия увеличения весовой функции λ, в этой ее части, заключается в том, что система нуждается в дополнительных активных силах X', которые приводили бы соответствующие $(n-\gamma')$-е компоненты сырьевой базы в полезное состояние.

Отсюда следует один интересный вывод, который связан с минимизацией отходообразования в источнике их появления [10]. Он гласит следующее.

Многообразие термодинамических сил, принимающих участие в преобразовании материальных потоков в рамках производственной системы, должно быть направлено не только на преобразование избранных компонентов в полезную продукцию. Структура этих сил должна быть рассчитана на преобразование всей номенклатуры компонентов сырья в полезную продукцию.

Иными словами, должно выполняться условие $X_i' \to X_i$ или $X_j'' \to 0$ при $\gamma' \to n$ (см. рис. 3.1), что способствовало бы переходу всей системы в сильно неравновесное состояние с соответствующими последствиями для более высокой ее организованности. Действительно, кривая (назовем ее феноменологической, по названию коэффициентов $L_{ij} = L_{ji}$), отражающая соотношение сил, обеспечивающих производство полезной продукции и отходов (рис. 3.2) в приложении к производству энтропии в системе, дает некоторое представление о собственной области с теоретически достижимым минимумом потерь сырья в виде отходов. Этот минимум находится в окрестностях точки $\left|\sigma[S] = 0; \lambda = 1\right|$. Причем интегральная область $\int_{\lambda} \sigma[S]\,\mathrm{d}\lambda$ зависит от размеров тензорной матрицы $\sum_{ij} L_{ij} X_i X_j$. Чем больше этот показатель, тем больше интегральная составляющая феноменологической кривой и, соответственно, больше размер теоретически достижимого термодинамического минимума отходов в системе. Если принять условие, при котором свободный индекс тензора $j \le 3$, то при значении $\lambda = 0{,}5$ максимальная величина производства суммарной энтропии в системе зависит только от феноменологических коэффициентов $L_{ij} = L_{ji} = L_j$ и не зависит от источника силы X_i (формула 3.13). Поэтому справедливо соотношение $\sigma[S]_{\lambda=0,5} = 0{,}25 k_i \sum_{j=1}^{3} L_j X_j$, что позволяет говорить о таких кривых как о «феноменологических» и существенно упрощает их расчет. Безусловно, из трех феноме-

нологических кривых для нас предпочтительным является анализ той, для которой выполняется условие максимальной энтропии — ($X_1 \neq X_2 \neq X_3 \neq 0$). Все остальные случаи, когда один или несколько источников сил, способствующих развитию диссипативных процессов, равны нулю, являются частными.

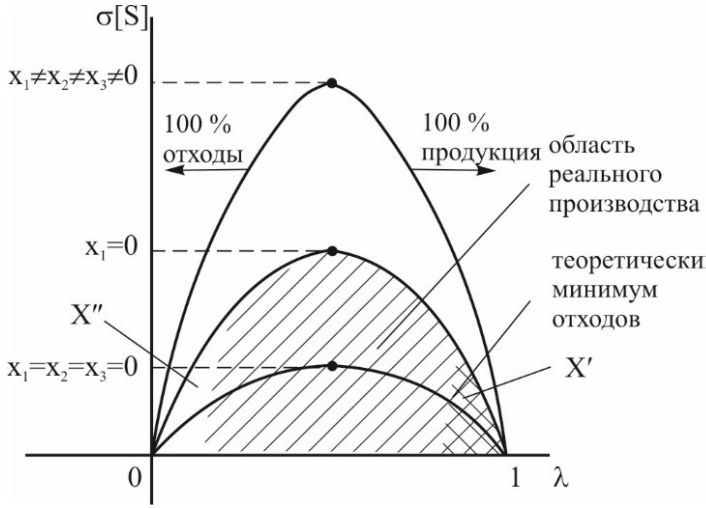


Рисунок 3.2 — Феноменологическая кривая и ее предполагаемая область теоретически минимального отходообразования в производственной системе, к которой относится кривая

Таким образом, с целью обеспечения минимизации отходов мы должны настаивать на кардинальных изменениях структуры существующих технологий. В основе их должны лежать такие технологические приемы и такие источники энергии, которые давали бы возможность необходимым образом изменять всю без исключения номенклатуру компонентов используемого сырья. Нет сомнения, что существенным резервом здесь является тщательный подбор сырья или предварительная его подготовка.

Подойдем к этому вопросу с другой стороны. Оговоримся, что при этом должно быть понимание того, что системы, предназначенные для производства полезной продукции, должны обладать определенными свойствами.

Мы опять постулируем, что, не зная механизмов функционирования системы, ее свойств, невозможно ею управлять.

В частности, известно, что соотношения типа «*p* & *w*» «отход–продукция» в производящих системах, как правило, далеки от нерегулированного хаотичного состояния, тем не менее, в них заложены начала хаотической динамики. Об этом говорят, в частности, цифры хаотического накопления уже существующих и новых промышленных отходов, как в мире, так и на отдельных территориях, и явная проблематичность их минимизации существующими линейными или нелинейными способами обработки.

Мы имеем дело с явной неопределенностью, которая сопровождает мировые процессы накопления промышленных отходов: с одной стороны она связана с огромным и неконтролируемым количеством существующих способов переработки сырьевых ресурсов для получения огромного количества товарной продукции и новых отходов, а с другой стороны — отсутствием каких-либо перспектив радикально минимизировать появление новых отходов в существующих системах и неоправданно высокое внимание, уделяемое переработке уже существующих отходов.

Поэтому, чтобы понять термодинамику отходообразования, мы обязаны использовать принципы бифуркации и последовательного хаоса применительно к таким системам. Вернемся к уравнению (3.13) и запишем его в следующем виде

$$\sigma[S] = \lambda(1-\lambda)\sum_{ij} L_{ij} X_j X_j = k\lambda(1-\lambda) \qquad (3.14)$$

Мы пришли к простейшему логистическому уравнению, подробно описанному в работе Роберта Мэя в 1976 году [11], которое при последовательности расчетов зависимости $\sigma[S] = f(k\lambda)$, отображающей динамику процессов, приводит к известным графикам (см. рис. 3.2). Если принимать во внимание систему «*p* & *w*» «продукция–отход», то первый сомножитель ($k\lambda$) отражает рост продуктивности производящей системы пропорционально коэффициенту (k), а второй ($1 - \lambda$) отражает ограничение, связанное с состоянием сырьевой базы, с отторжением отдельных компонентов сырья, налагаемое используемой в технологическом процессе энергией и состоянием технической системы. Зависимость от мощности продуцирования, т.е. получения полезной продукции $\sigma[S] = f(k)$, при многократном решении уравнения может вывести нас к простому удвоению

результата, то есть к бифуркации, и теоретически это удвоение может многократно повторяться [12]. Тогда любая система, обеспечивающая производство полезной продукции и отходов, может подпадать под закономерности неопределенных бифуркационных систем, соприкасаясь с известными положениями теории хаоса.

Нас не должно смущать то, что такие многократные бифуркации не очевидны в большинстве известных технологических процессов. Они могут относиться только к большим массивам данных о бесконечном многообразии самих технологических процессов и массовости процессов образования отходов. В том числе, это связано и с цикличностью во времени для абсолютного большинства технологических процессов, а также с упрощенным состоянием энергообеспечения большинства таких систем, в которых используется, как правило, один источник энергии, что затрудняет процессы последовательного удвоения результатов. *Именно качественный энергетический дефицит в технологических процессах мы позиционируем как одну из важнейших причин появления отходов в любом технологическом процессе*.

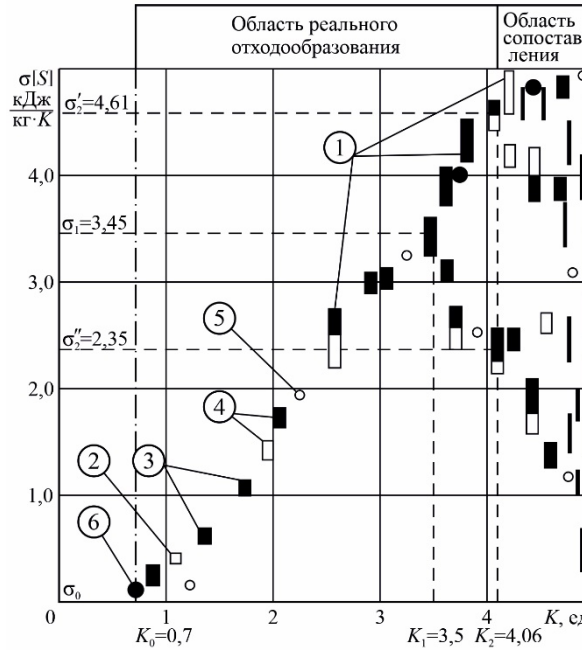
В теоретическом варианте [11], при значениях $0 < k < 1$ изменение функции не происходит; при росте коэффициента примерно до $k = 3{,}5$ мы видим увеличение значений функции, а при увеличении коэффициента $k = 3{,}57$ происходит вариантное удвоение функции, то есть она входит в состояние бифуркации. Подобное поведение функции (3.13) известно, однако для наших технологических систем, ориентированных на получение готовой продукции и параллельного отхода, оно не очевидно, если не относить только к одному конкретному технологическому процессу и не обращать внимания на огромное многообразие существующих равнозначных технологических процессов.

Тем не менее.

Как будет показано ниже на многочисленных примерах, подобные зависимости в первом приближении имеют право на существование в технологических процессах. Отличие от последовательных бифуркационных удвоений в других системах — экономических, социальных, заключается в глубине временного проникновения этих бифуркаций. Это то, чего не может нам дать любой циклический технологический процесс.

Аргументом здесь могут служить некоторые свойства, характерные для бифуркационных систем, которые можно увидеть в любом технологическом процессе. Мы не можем утверждать, что делаем абсолютно доказательный посыл. Но непрерывность и необратимость получения отходов всеми технологическими системами в мире, приведшая к современному состоянию загрязнения окружающей среды, может быть доказательным примером присутствия хаоса если не в экономический мировой системе, то, по крайней мере, в технологиях массового производства полезной товарной продукции. Развитие этой области человеческой деятельности, если рассматривать ее с позиций массового же отходообразования, позволяет позиционировать эти процессы как хаотические в целом. Рассмотрим их подробнее.

Значения коэффициента (k) в последовательности технологий определяются величиной $\sigma[S]_{\max}$ при $\lambda \approx 0{,}5$ на феноменологических кривых Л. Онсагера. Эти точки отмечены в координатах «изменение энтропии — весовой коэффициент λ» для технологических процессов: аглодоменного, коксохимического, сталеплавильного и ферросплавного, порошкового передела, в транспортно-логистических операциях, в сопутствующих или вспомогательных металлургических и энергетических производствах, в технологиях виноделия и сыроварения, в строительных технологиях, в нанотехнологиях поверхностных покрытий, в технологиях обработки (раскрой, механическая обработка) материалов, некоторых агротехнологиях, в технологиях биологической очистки, в технологиях переработки отходов, в том числе, бытовых, при очистке питьевой воды и некоторых других. Данные исследований зависимости $\sigma[S]= f(k)$ для самых различных технологий представлены на рис. 3.3 в виде обособленных точек исходных значений изменения энтропии. С учетом погрешностей, полученных путем обработки экспериментальных данных, цифры на графике в области удвоения результатов могут быть примерно сопоставимыми закономерностям, изложенным в работе [12].



1 — металлургические технологи; 2 — растениеводство;
3 — строительные технологии; 4 — обработка материалов;
5 — пищевые технологии; 6 — переработка отходов

Рисунок 3.3 — Расчетные данные для производства энтропии в уравнении Л. Онсагера для различных технологических процессов

Для периода первого удвоения на графике (см. рис. 3.3) запишем следующее отношение

$$Fe_k = \frac{k_1 - k_0}{k_2 - k_1} = \frac{3{,}45 - 0{,}71}{4{,}06 - 3{,}45} = 4{,}49\,,$$

что для этого периода сопоставимо с первой константой Фейгенбаума для уравнения типа (3.14), условно обозначенной здесь как Fe_k и равной 4,669. Разброс с экспериментальными данными составил 3,98%, что вполне удовлетворительно. В свою очередь, полученное из графика отношение, условно обозначенное как

$$Fe_\sigma = \frac{\sigma_1[S] - \sigma_0[S]}{\sigma_2[S] - \sigma_1[S]};\quad Fe_\sigma = \frac{3{,}45 - 0{,}01}{4{,}61 - 3{,}45} = 2{,}96;$$

$$Fe_{\sigma} = \frac{3{,}45 - 0{,}01}{3{,}45 - 2{,}35} = 3{,}127;$$

с определенной погрешностью можно сопоставить со значением второй константы Фейгенбаума Fe_{σ}, равной 2,503. Погрешность в данном случае находится в диапазоне $18{,}26 \div 24{,}9$ %, что является слабо сопоставимым результатом по сравнению с теоретическими данными. Следует предположить, что если бы существовала возможность рассматривать процедуры последующих бифуркационных удвоений в многоцикловых технологических процессах, то можно было бы получить более точные значения постоянных Фейгенбаума, которые вполне достоверно характеризуют свойства системы, в области бифуркаций и организованной хаотичности [11]. Тем не менее, полученные значения для таких свойств систем, как Fe_k и Fe_{σ}, показывают, что объекты нашего исследования могут подпадать под закономерность неопределенности бифуркационных систем. Можно выразить предположение, что именно такие механизмы хаоса, связанного с многообразием произвольностей, которые присутствуют в любом технологическом процессе, опосредованно приводят к лавинообразным процессам производства отходов, свидетелями которого мы являемся. И справиться с этим количеством накопленных промышленных отходов пока что никто не берется. В лучшем случае, переработке подлежат только вновь получаемые промышленные отходы. Это состояние, весьма далекое от системного, более напоминает хаос.

Подойдем к этому вопросу с другой стороны.

Рассмотрим в совокупности функцию развития производной системы как $F(x) = f(x) + \varphi(x)$, где слагаемое $f(x)$ соответствует наработке полезного вещества («прибыли», по И. Пригожину [7, 13]), а $-\varphi(x)$ — функция, соответствующая оттоку вещества из системы (отходу). Каждая из составляющих может быть положительной или равной нулю. Для такой зависимости справедливо отношение $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = F(x)$. При условии $f(x) = -\varphi(x)$ точки пересечения этих двух графиков должны соответствовать стационарным состояниям системы. Если такая стационарность определена линейными зависимостями $f(x)$ и $-\varphi(x)$, то система имеет только одно устой-

чивое состояние в точке пересечения этих функций. Иначе следует говорить о неоднозначной стационарности системы (формула 3.13). В последнем случае возможно четыре варианта устойчивости стационарного состояния системы. В первом случае (обозначим его *S*1) равновесная устойчивость сохраняется только при существовании относительно отрицательных флуктуаций по графикам $f(x)$ и $-\varphi(x)$. Во втором случае (*S*2) сохранение равновесной устойчивости обеспечивается как относительно положительных, так и относительно отрицательных флуктуаций. В третьем случае (*S*3) это касается только относительно положительных флуктуаций, а в четвертом случае (*S*4) равновесная устойчивость недостижима ни при каких внешних флуктуациях.

Нас в этом случае будет интересовать направление движения производственного процесса либо в сторону продуцирования «прибыли», либо в сторону «оттока» вещества из системы. Очевидно, что это направление будет зависеть от условий равновесия для реакций, протекающих в системе, и будет определять сумму веществ, полезно преобразованных и бесполезно отторгнутых данной системой.

Этот подход может быть более обобщенным для получения информации о теоретическом минимуме отходообразования по сравнению с формулой (3.12). Рассмотрим его подробнее.

В качестве примера функции развития $F(x) = f(x) + \varphi(x)$ для процесса производства стали в кислородном конвертере примем зависимость содержания углерода в металле от интенсивности подачи кислорода в конвертер. Здесь слагаемое $f(x)$ должно соответствовать получению полезного продукта в виде стали с низким содержанием углерода, а $-\varphi(x)$ — получению отходов в виде оксидов углерода и карбидов с газами и шлаками. Такая зависимость описана в литературе [14]. Эта функция содержит как продуктивную составляющую, так и ту ее часть, которая отторгается в виде потерь или отходов. Но каждый из получаемых видов — продукция и отходы — имеют в своем содержании углеродсодержащие компоненты.

Изобразим продуктивную часть, а именно жидкий металл, со скоростью выжигания углерода в виде графика 1 (рис. 3.4) в некоторой области исходных данных [14]. Углерод в конвертерной плавке изначально содержится в сырьевом материале — чугуне и ломе. В первом его больше (3,3–4,3%), во втором — меньше

(до 0,5%). Сама идеология кислородно-конвертерной плавки состоит в максимальном (по технологии) «выжигании» углерода из чугуна с помощью кислородного дутья и доведении состава металла до содержания в нем углерода в пределах 0,1–0,6% в зависимости от марки стали. При этом остаточный углерод вместе с кислородсодержащими элементами распределяется между газовой и жидкой фазами и теряется. Большая часть углерода вместе с отходящими газами в виде окислов удаляется из конвертера. Это отход. Определенная доля вместе с мелкими капельками металла и шлака выносится из конвертера.

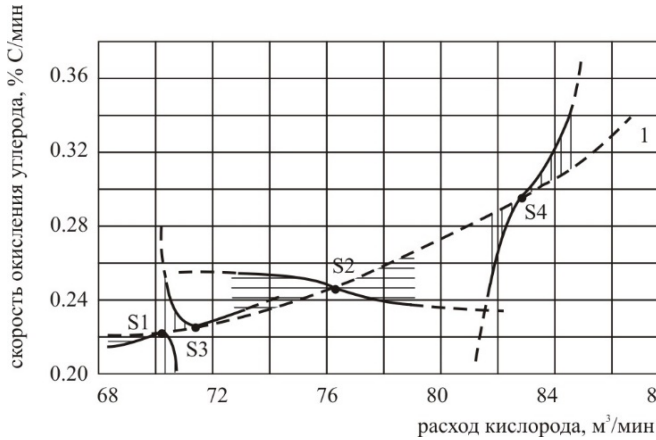
Очевидно, что обе функции: и $f(x)$, и $-\varphi(x)$ — являются нелинейными. Поэтому понятно, что их пересечение с кривой 1 при различных режимах ведения плавки дает полное многообразие вариантов, при которых достигается равновесность между углеродсодержащими материалами в полезной продукции и в продуктах отторжения.

Сразу отметим, что область на графике (см. рис. 3.4), соответствующая окрестностям точки *S*2, относится к стационарно устойчивому, равновесному состоянию, при котором любые изменения расхода кислорода, направленного в зону реакции, не дают сколь-нибудь существенного увеличения скорости окисления углерода в зоне основной реакции. Можно говорить, что в области точки *S*2 имеет место состояние, при котором $f(x) = \text{const}$ и $\varphi(x) = \text{const}$. На рис. 3.4 это области с горизонтальной штриховкой.

И наоборот, состояние системы в области точки *S*4 очень мало соответствует состоянию устойчивости и равновесия. Даже относительно небольшие изменения расхода кислорода в зоне горения приводят к существенным изменениям в скорости сжигания углерода. При этом функция развития системы существенно зависит от расхода основных компонентов реакции и далека от стационарности. Эти области отмечены вертикальной штриховкой.

И, наконец, в окрестностях точек *S*1 и *S*3 можно наблюдать устойчивые равновесные состояния, относящиеся к расходной части $\varphi(x)$ и только доходной части $f(x)$ системы соответственно (горизонтальная штриховка на см. рис. 3.4). Две другие ветви графиков в окрестностях точек *S*1 и *S*3 дают явно неравновесные и неустойчивые соотношения между доходной и отходной частями

вещества, в данном случае углеродсодержащих компонентов в металле — $f(x)$, шлаке и газовой фазе — $\varphi(x)$.



1 — скорость окисления углерода в металле

Рисунок 3.4 — Область устойчивости функции $F(x)$ для технологии обезуглероживания конвертерной стали

Для того, чтобы показать унифицированность подхода, в качестве следующих примеров рассмотрим работу однотипных агрегатов для электродуговой плавки металлов: железа и алюминия. Совместим соответствующие графики зависимости потерь (X'') в виде окислов алюминия (Al_2O_3) и окислов железа (FeO) от производительности соответствующих плавильных агрегатов с феноменологической кривой $\sigma[S] = f(\lambda)$ (рис. 3.5). Здесь первая зависимость опосредована расчетной функцией в координатах $\lambda(P)$, где в качестве силового параметра системы принимаем производительность системы (P, кг/ч). Для таких графиков определены стационарные состояния системы, устойчивые относительно как отрицательных, так и относительно положительных флуктуаций ($S4$). Эта сильно неравновесная область с $0{,}85 < \lambda_{FeO}^{(T)} < 1$ и $0{,}91 < \lambda_{Al_2O_3}^{(T)} < 1$ соответственно может определять условный теоретический уровень минимального отходообразования по пыли соответствующих окислов.

Причем в зависимости от соотношения сил и потоков $(\sum_i J_i X_i)$ в уравнении (3.13) можно получить предельные параметрические

кривые $\sigma[S]_{FeO}$ и $\sigma[S]_{Al_2O_3}$, например, при $X_1 = X_2 = 0$ и при $X_1 = 0$ соответственно, для которых определены свои точки $S3_{FeO}$ и $S3_{Al_2O_3}$, также соответственно. В их окрестностях устойчивость стационарного состояния гарантируется только относительно, например, положительных флуктуаций. В этом случае мы имеем реальный уровень отходообразования $0,34 < \lambda_{FeO}^{(\Phi)} < 1$ и $0,91 < \lambda_{Al_2O_3}^{(T)} < 1$ соответственно.

В пересчете на параметр $X'' = (1-\lambda)X$ получаем, что реальный уровень отходообразования в $(1-0,34)/(1-0,85) = 4,4$ раза превышает теоретически возможный минимум для плавильной системы по пыли окислов железа и в $(1-0,61)/(1-0,91) = 4,33$ раза превышающий минимум отходообразования по пыли окислов алюминия.

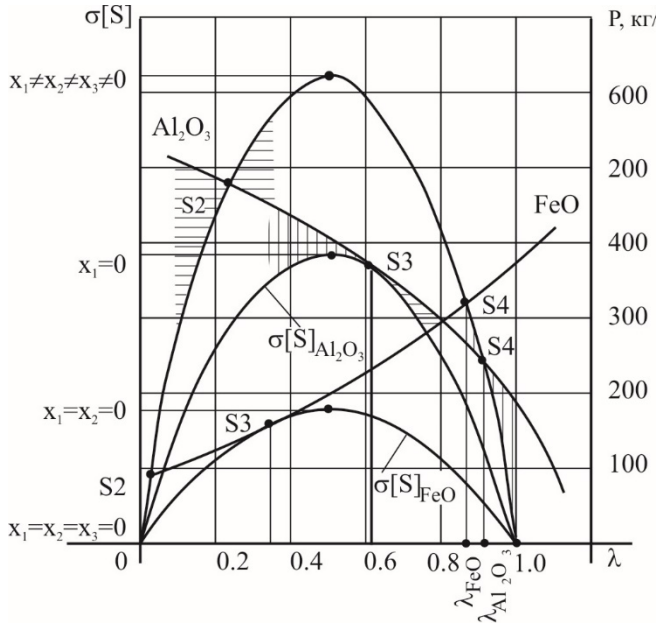
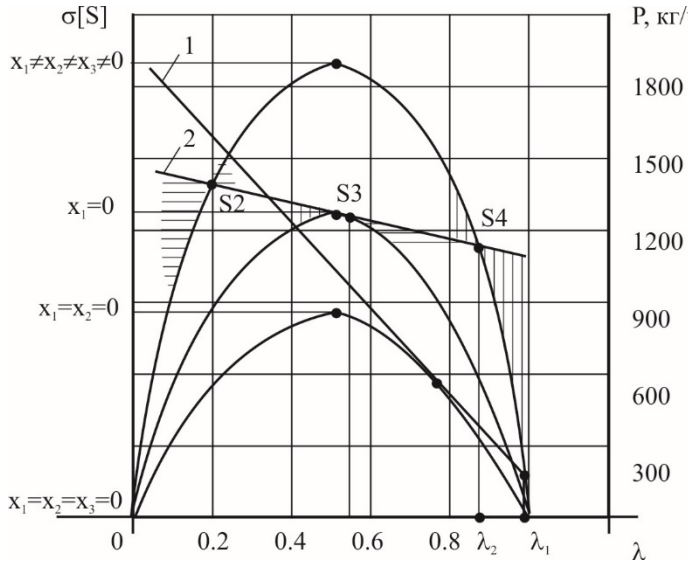


Рисунок 3.5 — Диаграмма для расчета теоретического минимума отходообразования пыли окислов железа и алюминия в производственных системах при выплавке соответствующих металлов

Имея реальный уровень отходообразования по пыли окислов железа в пределах 0,79÷1,26 г/кг расплава железа [15], можно прогнозировать его минимальный уровень в пределах 0,179÷0,288 г/кг.

Для плавки алюминия такой минимум может находиться в пределах 0,06÷0,12 г/кг расплава алюминия (см. рис. 3.5). Но для этого потребуются совершенно новые источники энергии и несколько измененные технологические процессы.

И еще пример. Технология производства изделий методами порошковой металлургии предусматривает процедуры смесеприготовления на смесителях типа КПМ 2.055.001, лопастных смесителях и др., а также формовку порошка на прессах типа КАО628, ДА-1523, ДА-1534 и др. Эти операции сопровождаются интенсивными пылевыделениями металлического порошка. Попробуем определить соотношение между фактическим и минимальным отходообразованием в этих производствах (рис. 3.6).



1 — участок смесеподготовки; 2 — участок формовки

Рисунок 3.6 — Диаграмма для расчета теоретического минимума металлического порошка в порошковой металлургии

Если для смесеприготовления фактическое пылеобразование достигает 87 г/ч [15], и это соответствует значению $\lambda = 0,74$, то теоретически обоснованному минимальному уровню отходообразования должно соответствовать значение $0,97 < \lambda < 1$. При этом количество металлической пыли не должно превышать

$87 \cdot (1 - 0{,}97)/(1 - 0{,}74) = 10$ г/ч. Для участка формовки на прессах это значение не должно превышать $630 \cdot (1 - 0{,}87)/(1 - 0{,}54) = 178$г/ч для наиболее производительного пресса. Здесь 630 г/ч соответствует фактическому максимальному отходообразованию в виде металлической пыли при порошковой формовке на прессе производительностью 1800 кг/ч по данным [15]. Для пресса с производительностью 120 кг/ч такой показатель не должен превышать 11 г/ч.

Во всех этих случаях мы приводим данные по отходам, загрязняющим воздух, без учета различных средств их улавливания.

Глава 4.
Смысловое значение условия термодинамического неравновесия в технологических процессах

Очевидно, что отношение энергетического воздействия на различные компоненты сырья, применяемого в технологическом процессе, становится основным фактором, который определяет разделение сырья на «полезные» компоненты и «ненужные». В каждом конкретном случае это зависит от способов влияния применяемой энергии на эти компоненты.

Отличие между уровнем термодинамического неравновесия для различных компонентов сырья состоит в том, что в отношении определенного термодинамического параметра для конкретного компонента сырья, в технологическом процессе создается соответствующий энергетический параметр, который вызывает запрограммированные изменения в состоянии этого компонента, придающие ему те свойства или качества, которые делают его полезной продукцией.

И наоборот, в отношении некоторого термодинамического параметра другого компонента, входящего в состав данного сырья, в технологическом процессе не находится соответствующего энергетического параметра, который целенаправленно воздействовал бы на этот компонент. Свойства этого компонента под воздействием имеющейся в системе энергии, почти не меняются либо меняются в произвольном направлении, и его потребительские качества не проявляются. Это отход.

Примерами подобных показателей (параметров), характеризующих условия термодинамического неравновесия в производственных системах, являются:

– градиенты определенных параметров: разность температур, приводящая к возникновению, например, теплопроводности (закон Фурье), излучения (законы Кирхгофа, Стефана–Больцмана);

– разность концентраций и сопровождающая ее диффузия и массоперенос (законы Фике, термодиффузия);

– разность химических потенциалов и соответствующие химические реакции (законы химической термодинамики);

– разность давлений и осмос (закон Вант Гоффа, эффект термоосмоса);

– отсутствие компенсированных межмолекулярных сил в поверхностном слое твердого вещества и соответствующие им свойства сорбции (теория Поллани);

– силы электростатического взаимодействия (закон Кулона);

– разность электрических потенциалов и движение электронов в проводниках (закон Ома, эффект Зеебека);

– электрический ток и нагрев проводника (закон Джоуля–Ленца, эффект Пельтье);

– электролитическая диссоциация (закон Аррениуса) и др.

Отдельной группой термодинамических параметров, влияние которых на компоненты сырья приводит к изменению его свойств, являются нормативные параметры этих веществ, теплоемкость, вязкость, плотность, критические температурные точки (плавления, замерзания) и др.

Сложнее это происходит в чисто механических системах, где приходится идти на определенные упрощения в термодинамических расчетах.

Обобщенная задача для любого технологического процесса, в той или иной мере, состоит в создании таких условий, при которых за счет термодинамической неравновесности некоторой части сырья по отношению к характеру энергетического воздействия, этому сырью придаются нужные, полезные для потребителя качества или свойства. Эти действия не самопроизвольны, не спонтанны, а диктуются теми термодинамическими параметрами, которые заложены в алгоритме данного технологического процесса.

Основным результирующим показателем для оценки такой термодинамической неравновесности является изменение энтропии системы, иногда называемое скоростью изменения энтропии $(\sigma = \mathrm{d}S_{\text{необр}}/\mathrm{d}t > 0)$. Но, в данном случае, это уже не абсолютная необратимая энтропия $\mathrm{d}S \geq 0$, а функция диссипации (Ψ), для которой справедливо выражение И. Пригожина (пояснения см. ниже)

$$\mathrm{d}\Psi = \mathrm{d}_{x_k}\Psi + \mathrm{d}_{j_i}\Psi = \sum_i J_i \mathrm{d}X_k + \sum_i X_k \mathrm{d}J_i . \qquad (4.1)$$

В слабонеравновесных термодинамических системах (расположенных вблизи состояния равновесия) показатель $(\pm\sigma_0)$ отображен в уравнениях Л. Онсагера (1931 г.), в полном соответствии с теоремой, носящей его имя, о симметричности кинетических показателей $(L_{i,k}=L_{k,i})$ в термодинамически необратимых процессах, таких как, например, тепловые процессы, диффузия, отдельные химические реакции и др., где имеются некоторые потоки с плотностью (j_i), вызываемые отклонениями обобщенных параметров — термодинамических сил X_k, таких, что $(j_i=\sum_k L_{i,k}X_k)$. При этом

$$\pm\sigma_0 = \sum_i j_i\, X_i = \sum_i (\sum_k L_{i,k}\, X_k)\, X_i\,. \qquad (4.2)$$

В сильно неравновесных системах И. Пригожина показатель $(\pm\sigma_0)$ опосредованно включен в уравнении (4.2) в виде

$$\mathrm{d}_{X_k}\Psi = \mathrm{d}_{J_i}\Psi = 0{,}5\mathrm{d}\Psi \qquad (4.3)$$

в полном соответствии с теоремой этого автора (1947 г.) о том, что при определенных внешних условиях, минимальность энтропии (не более 50%) в открытой неравновесной системе достигается за счет создаваемых, в виде указанных выше параметрических градиентов, искусственных препятствий для роста функции диссипации (Ψ).

Для устойчивого равновесия либо для состояния, близкого к устойчивому, соотношение локальной диссипации и производства энтропии имеет вид $\sigma=\frac{1}{T}\Psi$, что позволяет, с некоторой погрешностью, рассчитывать энтропийную динамику вдали от состояния термодинамического равновесия.

При количественных расчетах энтропийной динамики в термодинамически неравновесных системах принимается во внимание гипотеза локального равновесия, согласно теореме Пригожина, в той ее части, когда приведенная к единице массы энтропия в качестве производимой, например, в явлениях теплопроводности, вязкости, диффузии и т.д., не возрастает. Поэтому расчет задачи определения параметров неравновесности в рамках технологического процесса может сводиться к решению линейного дифференциального

уравнения типа $j_i = \sum_i L_{i,k} X_i$ в координатах теоремы Л. Онсагера. В сопоставимости, для этого нужны измеряемые на опыте параметры, величины которых легко соотнести с энергетическими характеристиками технологического процесса.

Применение изложенной методики становится весьма эффективным при решении самых различных задач как в области минимизации отходов, так и в других случаях, связанных с отходообразованием в самых различных технологиях. Далее мы рассмотрим это на ряде весьма интересных примеров из области управления потоками сырья в технологическом процессе.

Глава 5.
Минимизация отходообразования в источнике возникновения — современный вызов в технологических процессах

Современный подход к проблемам отходообразования и минимизации отходов в источнике образования становится проблемой системного управления не только этими процессами, но и основами создания современных технологических процессов, позволяющих получать минимально допустимый, с точки зрения естествознания, отход. Несколько размыто с позиций экономики и систематики об этом говорится в работах [1, 2].

Переработка промышленных отходов, их утилизация, вторичное использование и все, что всегда относилось к поведению с отходами, основано на традиционных инженерных решениях, ориентированных на дополнительные энергетические и трудовые затраты, эффективность которых, как правило, невысока. Все известные способы переработки отходов, их утилизация — это уже постфактум, когда отход стал реальностью. Как следствие, общество имеет проблему с все возрастающим количеством промышленных отходов, справиться с которыми уже почти невозможно. На каждую переработанную тонну существующих в мире отходов появляется семь тонн новых промышленных отходов.

Резюмируем тот новый подход, который мы предлагаем и который связан с дальнейшим развитием технологий получения товарной продукции. Эти методики не касаются переработки уже накопившихся промышленных отходов, как факта состоявшегося [3].

Обратимся к рассуждениям П. Кузнецова в области неравновесной термодинамики, которые относятся к переходным процессам между твердым телом и жидкостью, между жидкостью и газом. Это будет не вполне точный анализ, но он может показать нам определенные тенденции в понимании и развитии неравновесных процессов в таких системах.

Для начала, вспомним, что для убывающей части функции распределения скоростей (а значит и энергий) молекул вещества в газе общее число таких молекул определяется, как

$$dN = N_0 \exp(-\frac{Q}{k \cdot T}). \quad (5.1)$$

Уходя от интегрирования, покажем, что для решения нашей задачи следует определить соотношение верхнего и нижнего энергетических уровней молекул N_1 и N_2

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp(\frac{Q_2 - Q_1}{k \cdot T}), \quad (5.2)$$

показывающих степень неравновесности системы, как разности функций изменения энергии. Для макросистем энергия определяется такими параметрами, как температура, давление, концентрация вещества, количество молекул, и некоторыми другими (в зависимости от состояния и принадлежности объекта): $Q_1(t_1, p_1, c_1, n_1, ...)$ и $Q_2(t_2, p_2, c_2, n_2, ...)$ — каждый из которых может становиться параметром отображения состояния его неравновесности. Логарифмируя левую и правую части уравнения (5.2), получим известное в термодинамике выражение для абсолютной температуры

$$T = \frac{Q_2 - Q_1}{k(\ln N_1 - \ln N_2)}, \quad (5.3)$$

в котором числитель отражает скрытое условие неравновесности системы ΔQ, а знаменатель — соответствующее этому изменение энтропии $(\ln N_1 - \ln N_2)$ умноженное на постоянную Больцмана (k). Например, для постоянной температуры T существует состояние, при котором $Q_2 - Q_1 \sim (\ln N_1 - \ln N_2)$. Известное условие, при котором система находится в абсолютном термодинамическом равновесии, обозначим как

$$Q_2 = Q_1 \text{ и } T = 0. \quad (5.4)$$

В общем виде, все остальные состояния представляют ту или иную степень неравновесности системы в зависимости от параметров $(t_2 - t_1)$, $(p_2 - p_1)$, $(c_2 - c_1)$, $(n_2 - n_1)$ и других.

Таким образом, фактор степени неравновесности является определяющим не только для состояния компонентов сырья, но и для распределения этих компонентов между будущей товарной продукцией и отходом в любом технологическом процессе, о чем можно косвенно судить по данным [4].

Для этого необходимо следующее.

Мы обращаем внимание на структуру исходной сырьевой базы и на качество и источники энергии, которые принимают участие в этих процессах. Структура сырьевой базы, как правило, такова, что часть компонентов сырья, после некоторого энергетического воздействия, переходит в состав готовой (товарной) продукции, а другая часть, при помощи тех же самых источников энергии, той же самой технической системы, преобразуется таким образом, что становится бесполезным отходом. Поэтому, следует считать, что продукция — это результат упорядоченных действий с заранее заданным результатом и минимумом затрат, в том числе — энергетических. Отходы же могут получаться в результате тех же самых, только неупорядоченных воздействий на другую часть сырьевых компонентов в условиях, для которых данная технология не предусмотрена.

Мы приходим к выводу, что работы по созданию продукции и отхода осуществляются по одинаковым алгоритмам, с равнозначными и сопоставимыми затратами энергии, и эти два результирующих материальных компонента являются равноправными, отличающимися только субъективным отношением к ним со стороны человека с точки зрения их потребительской ценности.

Мы еще раз утверждаем, что *многообразие источников энергии, принимающих участие в преобразовании сырьевых материальных потоков в рамках технологического процесса, должно быть направлено не только на преобразование избранных компонентов в полезную продукцию. Структура этих источников должна быть рассчитана на преобразование всей номенклатуры компонентов сырья в полезную продукцию*. Идет речь о свойстве термодинамического двуединства производственной системы, как причины появления отходов. Когда *одна и та же технология по отношению к определенной части компонентов сырья проявляется как сильно неравновесная и функционирует по законам нелинейной термодинамики, но, одновременно, по отношению к другой части сырья проявляет себя как слабо неравновесная и подчиняется законам линейной термодинамики.*

Для такого термодинамического двуединства производства готовой продукции и отходов мы вправе отметить наличие наложения этих двух необратимых процессов (рис. 5.1, а)

В свете сказанного можно ставить *задачу о недопущении (минимизации) образования отходов еще в процессе производственной деятельности*, видоизменив, соответствующим образом, энергетику и упорядочив сырьевую базу технологического процесса (рис. 5.1, б). Пока такие инженерные задачи перед человеком не ставились.

Возможности технологической энергетики с этих позиций в литературе изучены слабо. Как правило, если энергия применяется в технологическом процессе, только по прямому назначению в виде, например, постоянного или переменного электрического поля, нагрева или охлаждения, прямых химических реакций или взрыва, кинетической, потенциальной энергии некоторого груза или вращающегося инерцоида — накопителя энергии и других. Редко в одном и том же технологическом процессе используется одна и та же энергия в различных ее модификациях. Еще реже используются два различных, но согласованных между собой источника энергии.

Результат чаще всего такой — целенаправленная переработка относится только к тем компонентам сырья, которые интересуют производителя, и одновременная равнозначная, равносмысловая, но вынужденная переработка этими же источниками энергии остальной части сырьевой базы, которая превращает их в ненужный отход

А ведь иногда только несколько видоизмененная энергия позволяет управляемо воздействовать на другие компоненты сырья, превращая их в полезную продукцию (см. рис. 5.1, б). В качестве такого источника энергии, кроме основного, принимающего участие в данном технологическом процессе, может существовать налагаемое поле иного качества: *синхронизирующий энергетический сигнал, вторичное энергетическое воздействие, энергетическая модуляция сильного сигнала более слабым, резонансное воздействие и др.,* в частности, представленные на рис. 5.2. В частности, для усиления эффективности воздействия энергии, существуют способы обеспечения поля противоположного знака (см. рис. 5.2, б), знакопеременное поле во времени (см. рис. 5.2, в), высокочастотное поле того же качества (см. рис. 5.2, г), импульсное энергетическое поле того же качества, что и основное (см. рис. 5.2, д), и, наконец, поле резонансного состояния по отношению к исходному, если мы имеем дело с переменными полями (см. рис. 5.2, е). Каждая из этих модификаций дает в руки технологов новые возможности для влияния на компоненты соста-

ва исходной сырьевой базы в направлении переработки всех компонентов сырьевой базы технологического процесса.

Все эти способы управления энергетическими потоками являются вполне реальными. Общая задача состоит в том, чтобы, используя собственные ресурсы конкретного технологического процесса и технической системы, предназначенной для его реализации, обеспечить максимально полную и целенаправленную переработку всех компонентов сырья в такую продукцию, которая имела бы потребительскую ценность для человека.

Актуальным является вопрос о том, существуют ли такие технологии? Можно ли получить технологические процессы такие,

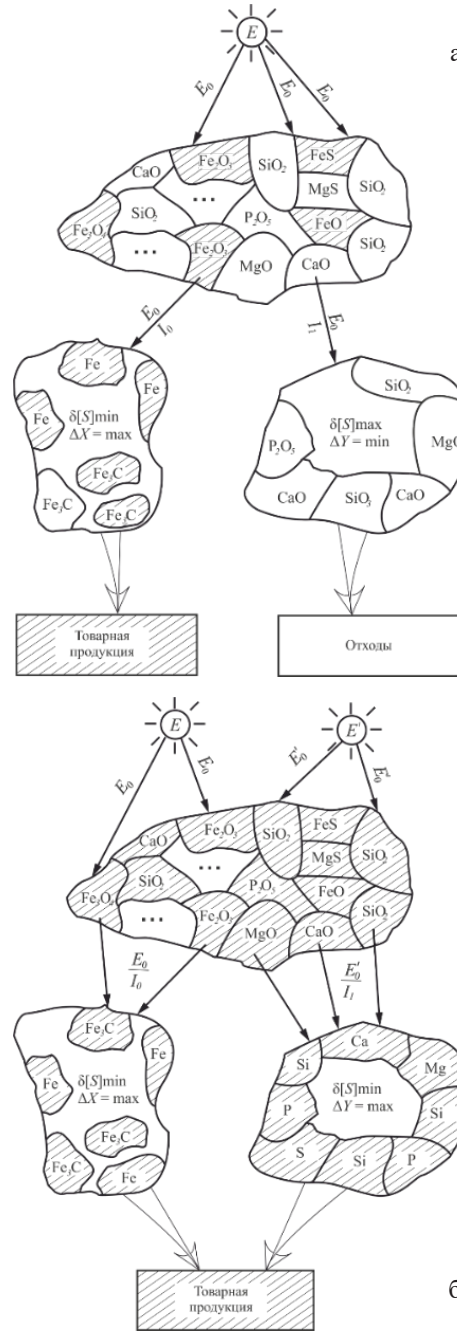
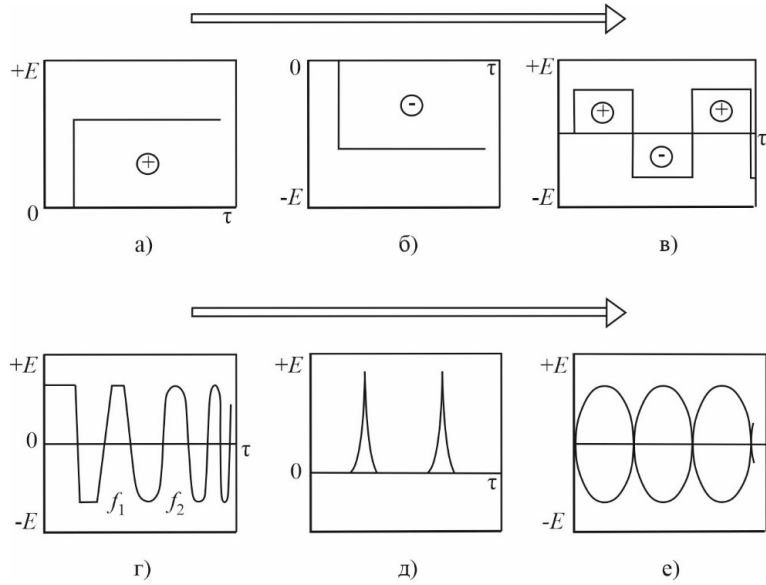


Рисунок 5.1 — Компонентная сырьевая и энергетическая базы традиционного отходообразующего технологического процесса получения железа (а) и технологического процесса, ориентированного на минимум отходов (б)

чтобы они были направлены на минимизацию отходов в источнике возникновения? Это вопрос альтернативы и вызова большинству современных технологий третьего–пятого технологических укладов. Отходоемкое металлургическое производство является весьма интересным объектом для реализации такого подхода в самых разных известных технических решениях, позволяющих минимизировать его отходы технологическим путем, с опытом которого можно познакомиться ниже.



а) энергетическое поле постоянного знака;
б) поле противоположного знака;
в) знакопеременное энергетическое поле;
г) высокочастотное переменное поле;
д) импульсное энергетическое поле;
е) резонансное частотное поле.

Рисунок 5.2 — Линия развития характеристик энергетического поля, принимающего участие в технологическом процессе

Минимизация отходов в источнике возникновения, касательно любых искусственных технологий,— это явление, далеко не новое для природы. Наиболее эффективные природные системы, а именно, биологические, также имеют в своем арсенале подобные механизмы,

позволяющие не только локализовать, но и перерабатывать продукты и отходы жизнедеятельности клеток в удобоваримую для организма исходную сырьевую массу. Имеются в виду механизмы аутофагии, апоптоза, автолиз и др. [5]. В основе этих явлений в организме млекопитающего, в частности человека, лежат регулируемые процессы программируемого клеточного угнетения внутри самой клетки и переработка продуктов угнетения в специальных капсулах других клеток, в многоклеточных биологических системах. Эти механизмы были открыты не так давно, в середине прошлого столетия, однако их исследования дают весьма продуктивные в науке результаты и имеют практическое значение [6].

Аутофагическое угнетение, как термин, впервые предложенный в 1963 году Кристианом де Дювом,— это последовательная и целенаправленная переработка секвестрированной доли цитоплазмы, которая является внутриклеточной частью общего механизма пищеварения и обмена.

Человеческий организм теряет в сутки около $3 \cdot 10^{10}$ биологических клеток, общей массой до 200 граммов. Механизм восполнения клеточного запаса известен — это полиферация, удвоение клеток путем деления. Но куда деваются эти 200 граммов ежедневной биологической массы? Согласно теории аутофагии (самопоедания), все отмершие клетки, угнетенные чужеродные микроорганизмы, бактерии, вирусы в объемах лизосомных органелл клетки, *при некоторых внешних условиях*, формируются в так называемые аутофаголизосомы размером менее 1 мкм. Они подпадают под воздействие пищеварительного гидролитического энзим-фермента в составе элементов кислой среды органеллы (катепсины, фосфолипаза, сульфатазы и др.) и последовательно распадаются на первоначальные аминокислоты. В последующем эти аминокислоты служат строительным материалом для новых клеток [5, 6, 7]. Это своеобразная система утилизации и повторного использования строительного материала в биологическом организме при определенных условиях.

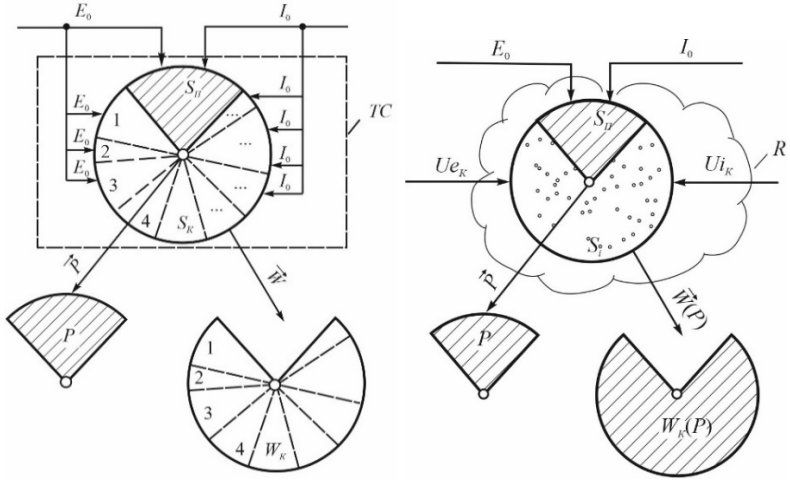
Важно то, что эти процессы являются естественными для любого многоклеточного организма как его составная часть. Чего мы пока не видим в искусственной природе и, в частности, в системах производства товарной продукции, в которой биологически и социально нуждается человек.

Энергетика процессов аутофагии в живом организме связана, в первую очередь, с механизмами энергетического и материального дефицита, когда вместо внешних источников энергии, углеводов, жиров, сахаров, организм вынужден пользоваться энергетическими ресурсами расщепления существующего материала, продуктов отмирания клеток и др. [8]. Энергия внешних источников далеко не вся тратится организмом человека на внешнюю работу. Часть этой энергии ΔE расходуется на обеспечение внутренних процессов жизнедеятельности, в том числе, на аутофагные и другие программируемые процедуры клеточного угнетения и переработки, таким образом, минимизируя собственные клеточные отходы. Термодинамика этих процессов весьма сложная, однако, в ней, так же, как и в любых других естественных и искусственных технологиях, заложены механизмы оптимизации состава «продукция–отход» на основе согласования исходного сырья и применяемых источников энергии.

Все это позволяет судить о перспективах этого способа минимизации отходообразования в современных и будущих искусственных технологиях.

Глава 6.
Перспективы методологий минимизации отходов в источнике их возникновения

Итак, термодинамическое двуединство одновременно существующих сильно и слабо неравновесных процессов воздействия энергии на разные компоненты сырья в любом технологическом процессе является причиной появления одновременно товарной продукции и отхода в конечном термодинамически равновесном состоянии (рис. 6.1, а). Для того, чтобы минимизировать производство отходов в некотором условном полимодальном реакторе *R* (рис. 6.1, б) — реальном технологическом процессе, необходимо подобрать компоненты сырьевой базы и источники энергии в технологическом процессе таким образом, чтобы каждый из этих компонентов получал такое воздействие своего вида энергии, которое бы переводило его из слабо неравновесного параметрического состояния в сильно неравновесное состояние, с учетом их различного термодинамического состояния.



а) б)

Рисунок 6.1 — Условная схема традиционного а) и *k*-полимодального; б) технологического процесса.

Здесь: *TC* — техническая система для организации технологического процесса; E_0 — исходная энергия для обеспечения техно-

логического процесса; I_0 — исходная информация для организации технологического процесса; S_n — многокомпонентная сырьевая база в той ее части, которая относится к продукции; S_k — многокомпонентная сырьевая база в той ее части, которая относится к отходам; P — полезная продукция; W — способ получпения отхода; W_k – отход; n — компонентность сырья, относящаяся к продукции; k — компонентность сырья, относящаяся к отходам; R — некоторый полимодальный реактор; Ue_k — дополнительное энергетическое вмешательство в компонентную базу сырья; Ui_k — дополнительное информационное вмешательство в компонентную базу сырья; $W_k(P)$— способы преобразования компонентов потенциальных отходов в товарную продукции в рамках полимодального реактора R.

Вне всякого сомнения, реализовать такие полимодальные технологии вместо отработанных десятилетиями традиционных технологических процессов — задача сверхсложная. Поскольку современная технология получения главного качественного продукта, ради которого затеяно это производство и ради чего трудилось не одно поколение специалистов, представляется почти завершенным техническим и инженерным решением. И любые вмешательства в такую технологию сопровождаются ухудшением качества этого основного продукта. Ради чего? Ради того, чтобы не допустить появления отходов? Задача весьма спорная, с точки зрения современных технологов. Это так. До тех пор, пока противоречие между потребностями человека и возможностями природы не станет несовместимым, а хаотические процессы накопления опасных отходов полностью не выйдут из-под контроля.

Современная статистика не скрывает того, что из более, чем 100 млрд. т самых различных минеральных материалов, в мире ежегодно извлекаемых из земных недр, только около 15 млрд. т превращаются в полезную товарную продукцию и только 29% из остатков находят повторное применение. На каждую тонну переработанных за год ранее накопленных промышленных отходов, появляется еще шесть тонн новых промышленных отходов, складируемых и загрязняющих окружающую среду. Например, металлургическая Европа научилась до 80% своих *вновь производимых* металлургических шлаков направлять на грануляцию. Из 24,6 млн. т доменных шлаков, произведенных здесь в 2016 году, 19,4 млн. т гранулируется для дальнейшего

использования. При этом во многих странах *старые шлаковые отвалы стоят почти нетронутыми* [1, 2]. Из ежегодных 42 млн. т металлургических шлаков, произведенных в Украине, 26 млн. т отправляется *в шлаковые отвалы* [3]. Переработке подлежит только каждая третья тонна металлургического шлака. В стране накоплено около 300 млн. т таких шлаков и каждый год не менее 10 млн. т новых шлаков отправляется в отвалы без переработки.

В странах СНГ реальная переработка металлургических шлаков не превышает 20% от произведенного [4]. Но и качество этой переработки желает оставаться лучшим. Предложения, которые выдвигают отечественные специалисты, в случае их выполнения, только приблизят нас к уровню Европы. То есть решения проблемы они нам не дают в обозримом будущем.

Такова прогрессия, за которой не поспевают даже в развитых странах Европы и Америки. И это не позволяет говорить о том, что общество справится с промышленными отходами в обозримом будущем. По крайней мере, пока не будут сформированы иные взгляды на историю и динамику развития технологических процессов, по крайней мере, тех, которые дали миру больше всего отходов: горнодобывающая промышленность, металлургия, энергетика.

Сошлемся только на одну из существующих на сегодня технологий, которые приближаются к идеальному конечному результату. Это технологии раскроя материала при помощи координатно-пробивного пресса, плазменной, лазерной, кислородной, гидроабразивной, электроэрозионной и кислородной резки, для штамповки обычных шайб. Можно уменьшать отходную часть за счет выделения на остатках полотна шайбы (продукцию) меньшего размера (например), уменьшая, таким образом, отходную часть в рамках собственно технологии раскроя. А можно, минимизировав термодинамическую составляющую (в виде термодинамического сопротивления), заранее разделить исходный лист на линейные заготовки и каждую из них кроить последовательно, получая из полосы отхода некоторую декоративную линию. Ее можно использовать в авангардной архитектуре, строительных конструкциях, в виде несущих спиралей, опорных «башмаков», огораживающих конструкций и др. [5, 6].

Рассмотрим теперь один из самых отходообразующих технологических процессов в металлургии — доменный, в результа-

те, которого получают чугун и доменный шлак. Для упрощения, не будем пока рассматривать пылегазовые отходы и загрязнение водного бассейна. В литературе известно множество способов переработки доменных шлаков [7, 8, 9, 10, 11, 12 и др.]. Общее, что их объединяет,— это трудозатраты, энергозатраты для того, чтобы привести в состояние товарной продукции уже полученный из доменной печи шлак.

Переработка доменных шлаков в прошлом веке постепенно стала актуальной проблемой, когда США, Германия, СССР, Бельгия, Люксембург, Индия, Китай, а за ними и другие страны — производители черного металла столкнулись с огромными шлаковыми отвалами, не только портящими природу, но ставящими перед людьми многие медицинские проблемы. Появились технологии переработки уже накопившихся шлаков. К ним относились:

– грануляция высокоосновного шлака с целью использования его при производстве портландцемента;

– производство щебня и пемзы с использованием определенных реагентов;

– постадийная переработка ковшевых остатков;

– пневмосепарация шлаков с выделением некоторых сплавов;

– производство шлакопемзового гравия при помощи вибропоризаторов;

– производство бесцементных шлакоблоков, литье тюбингов из расплавленных доменных шлаков;

– выделение абразивной составляющей при измельчении шлаков для струйной обработки поверхностей;

– придоменная грануляция шлака и др. Известен способ припечной переработки таких шлаков, когда шлак еще находится в ковше [12]. Исключается громоздкое шлаковое хозяйство, шлаки перерабатывают в жидком виде. Но, опять-таки, эта переработка дает тот же самый конечный продукт: гранулированный шлак, щебень, скрап.

Все эти способы были направлены, прежде всего, на переработку уже полученных шлаков, накопленных в различных отвалах, объемы которых постоянно росли. Других способов справиться со все взрастающими объемами накопления доменных шлаков пока не придумали. И, пока инженеры справлялись с одной тонной накопленных отходов, металлурги-технологи приносили в эти же самые

отвалы еще несколько тонн нового шлака. Потому, что за это же время они произвели пять-шесть тонн такого необходимого чугуна.

Перспектив как будто нет. Но посмотрим на эту проблему с другой стороны (см. рис 6.1, б). Традиционная конструкция доменной печи известна. Для простоты будем считать новый агрегат нашим теоретическим доменным реактором (*R*), поскольку он должен быть предназначен не только для получения товарного чугуна, но и для реализации других физико-химических процессов, сопровождающих основной доменный процесс в виде других выделяемых компонентов полезной продукции. Обычно шлаковый продукт доменной плавки в количестве не менее 40% от всего количества исходного сырья уходит в отходы. Наиболее общий состав жидкого шлака включает окислы кремния, кальция, магния, алюминия, фосфора, железа, магния, марганца, меди и некоторые другие.

Первое условие для альтернативной технологии состоит в том, чтобы создать внутри печи (реактора — *R*) условия сильного термодинамического неравновесия в отношении этих окислов. Рассмотрим некоторые из известных способов восстановления основных компонентов, присутствующих в доменном шлаке, которые теоретически могут быть реализованы в нашем реакторе.

1. Восстановление кремния из сырья и шлака. Из металлотермии известно, что восстановление кремния из его оксида алюминием возможно при температуре 1433 °С. Рассмотрим реакцию: $3SiO_2+4Al=3Si+2Al_2O_3$, при которой оксид кремния по термодинамическим условиям полностью взаимодействует с алюминием при $t = 400°$ С, образуя кремний и Al_2O_3. При более высоких температурах происходит образование Al_2SiO_5, $SiO_{(z)}$ и др. По данным [13] степень образования кремния на уровне 97–100% достигается в температурной области 500–1000 °С при количестве алюминия 4–8 кат. При этом давление в реакторе никак не влияет на протекание этих химических реакций. Согласимся, что теоретически такие условия можно создать на соответствующем горизонте доменного реактора, не допустив большую часть оксидов кремния в горн. Но этот процесс подлежит более тщательному исследованию, как самостоятельный объект для изучения.

Для полноты изложения можно сослаться на методы восстановления кремния из окисла и в струе водородной плазмы

($SiO_2+2H_2 \rightarrow Si+2H_2O$). Безусловно, мы получим не чистый кремний, с загрязнениями. Но он уже не попадет в отходы, становясь сырьем для дальнейшего получения монокристалла. Пока не ясно, как можно его реализовать в доменном реакторе.

2. Восстановление марганца. В доменном сырье марганец присутствует в виде оксидов Mn_2O_3, Mn_3O_4, либо двуокиси MnO_2, в доменном шлаке — только в виде MnO. В печи восстановление марганца до чистого элемента может идти в атмосфере углекислого газа поэтапно от высших оксидов к низшим, прямым путем:

$$Mn_3O_4+C \rightarrow 3MnO+CO+Q_1;$$

$$Mn_3O_4+CO \rightarrow 3MnO+CO_2+Q_2;$$

$$MnO+CO \rightarrow Mn+CO_2+Q_3.$$

Восстановление марганца из MnO твердым углеродом осуществляется при температурах от 1100 °С в области заплечиков печи. Это относится к примерно 30–45% марганца, который переходит в шлак и подлежит экстракции. Остальной марганец шихты усваивается чугуном. Остается открытым вопрос об извлечении чистого марганца из закрытого доменного реактора.

3. Восстановление фосфора.

Вначале, небольшой экскурс в будущее.

Фосфор находится в основе всего биологического разнообразия на Земле, как один из ключевых элементов для биологического строительства. В основном, человек применяет фосфор в виде суперфосфата, фосфористой муки, аммофоров для удобрения в растениеводстве. Только за последние пять лет мировая добыча фосфатов для этих целей увеличилась в пять раз. При этом основные запасы природного фосфора в Западной Сахаре, Хибинах существенно истощились. Основные держатели природных апатитов и фосфитов — Марокко, Россия, Китай, США с такими объемами добычи уже к концу века потеряют свои основные запасы. А потребность в фосфоре растет в прямой пропорции к увеличению народонаселения Земли. Потери фосфора связаны в основном с его вымыванием с полей в водоемы, в моря, в океаны. И нехватка фосфора значительно усложнит жизнь последующим жителям планеты. Уже

сейчас ученые склоняются к решению проблемы фосфора путем рационализации его потребления в не меньшей степени, чем это относится к углеводородам.

В то же время, любой металлургический шлаковый отвал промышленного предприятия, которое производит шлак на протяжении десятков лет, содержит сотни и тысячи тонн этого элемента в виде окислов типа P_2O_5 и др. Например, два шлаковых отвала компании «Метинвест» в г. Мариуполе, по самым скромным подсчетам, содержат номенклатуру крайне распределенных окислов фосфора, которые извлечь весьма непросто, в количествах не менее 0,6–1,0 млн. т. А таких отвалов только в Украине — десятки.

Вполне возможно, что фосфор, как элемент большинства видов минерального сырья на планете, станет тем фактором, который заставит человека более тщательно относиться к остаткам запасов этого сырья в целом.

А теперь, по существу. Содержание фосфора в аглоруде находится в пределах 0,05–0,06% и иногда достигает 1,5%. Электротермический способ восстановления фосфора из его окислов включает взаимодействие с углеродом кокса в присутствии кремнезема и может быть записан следующим образом:

$$Ca_3P_2O_8 + 5C + n\,SiO_2 \rightarrow P_2 + 3CaO \cdot n\,SiO_2 + 5CO\,.$$

Кинетика реакции проявляется при наличии высокотемпературного расплава и определенного модуля кислотности за счет SiO_2. При этом кислотность реактивной зоны может обеспечиваться и за счет присутствия окислов алюминия ради восстановления кремния. Практически все начальные условия для такой реакции (расплав, кокс, оксид кремния, наличие кислой среды, температура) имеются в доменном реакторе. Недостаток один: традиционная доменная печь не приспособлена для таких реакций. В первой главе мы попытались назвать такие реакторы полимодальными. Не будем менять терминологию и здесь.

Общие характеристики полимодального доменного реактора *R*, в котором теоретически могут состояться такие реакции, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 — Сводные данные по показателям влияния на отходообразование для условного бимодального реактора

№	Показатель	SiO_2	MnO	P_2O_5
1	Температура плавления (оксид /элемент), °С	1713/1414	535/1246	340/45
2	Температура в зоне реакции, °С	500/1000	1050/1100	~1300
3	Содержание компонента в шлаке,%	50/60	0,7/2,0	0,05/1,5%
4	Активный реагент	Al	C_{me}, CO	C, SiO_2
5	Реакция восстановления: – для SiO_2 $3SiO_2 + 4Al = 3Si + 2Al_2O_3$ – для MnO $MnO + CO \rightarrow MnO + CO_2$ и $MnO + C \rightarrow MnO + CO$ – для P_2O_5 $Ca_3P_2O_8 + 5C + nSiO_2 \rightarrow P_2 + 3CaO \cdot nSiO_2 + 5CO$			
6	Термодинамическая характеристика процесса	Экзотермизм	Эндотермизм	Эндотермизм
7	Продукт реакции,%	Si(97/99)	Mn (15/73)	P(56/99)
8	Пространственная координата в реакторе для протекания реакции	Лещадь доменного реактора	Заплечики реактора, шахта	–
9	Способ извлечения из реактора	?	?	?
10	Нежелательные взаимодействия	SiC, FeS	Раствор марганца в чугуне, Mn_2C	Fe_2P

Безусловно, температурный разбег для таких технологий и существующих в реакторе химических элементов и их соединений весьма существенный, что может привести к элементарному химическому противоречию. Очевидно, что реактор с такими параметрами создать весьма непросто. Но к этому надо стремиться.

Ведь, по существу, мы говорим о способах минимизации отходов в источнике их возникновения, т. е. в самом технологическом процессе.

4. Металлургическая наука спокойно пережила несколько теорий строения шлаков — от молекулярной и ионной до современных клатратных и ассоциатных теорий. Каждая из них что-то объясняла, где-то буксовала, что требовало новых исследований. Однако, все эти исследования велись только для того, чтобы изучить свойства шлака, как инструментария для получения качественного чугуна.

Не следует забывать, что, в соответствии с общепринятой теорией молекулярного и ионного строения металлургических шлаков, это жидкий электролит, вязкий, сложный по составу, компоненты которого находятся в условиях электрохимического взаимодействия, и, в то же время, он содержит окислы с ярко выраженной кислой и основной структурой [14]. Специалисты по шлакам выделяют не только ионную, но и ковалентную химические связи между компонентами, что позволяет более точно объяснить условия не только термической, но и электрохимической диссоциации в шлаковой среде.

Таблица 6.2 — Математические модели для определения удельного электрического сопротивления некоторых шлаков при температурах до 2500 °С (по данным работы [15])

№	Наименование шлака	Математическая модель, Ом·м
1	$CaO - Al_2O_3 - MgO$	$p = 3{,}91 + 2{,}24 \cdot 10^{-4}(Al_2O_3) + 1{,}26 \cdot 10^{-4}(CaO) - 6{,}73 \cdot 10^{-3} t + 3{,}86 \cdot 10^{-6} t^2$
2	$CaO - SiO_3 - Al_2O_3$	$p = 13{,}03 + 2{,}27 \cdot 10^{-2}(SiO_3) + 2{,}6 \cdot 10^{-2}(Al_2O_3) - 1{,}82 \cdot 10^{-2} t + 5{,}68 \cdot 10^{-6} t^2$
3	$CaO - SiO_2 - Al_2O_3$	$p = 1{,}463 - 3{,}55 \cdot 10^{-3}(CaO) + 1{,}9 \cdot 10^{-2}(SiO_2) + 1{,}73 \cdot 10^{-2}(Al_2O_3) - 1{,}66 \cdot 10^{-3} t$

Электрохимические свойства металлургических шлаков пока изучены недостаточно. Однако предпосылки к этому имеются [16, 17]. В работе [18] показано, что постановка электрохимических экспериментов, в сочетании с современными методами кинетического анализа, дает многие ответы на вопросы о поведении шлаков,

как электролитических растворов. Существует понимание того, как исполняются законы Фарадея и отклонение от них в шлаковых электролитах, перенос электрических сигналов через такие электролитические расплавы [19, 20] для объяснения установленного электрохимического характера взаимодействия между частицами в составе шлака. Мы научились оперативно контролировать электрическое сопротивление шлаковых ассоциатов (табл. 6.2).

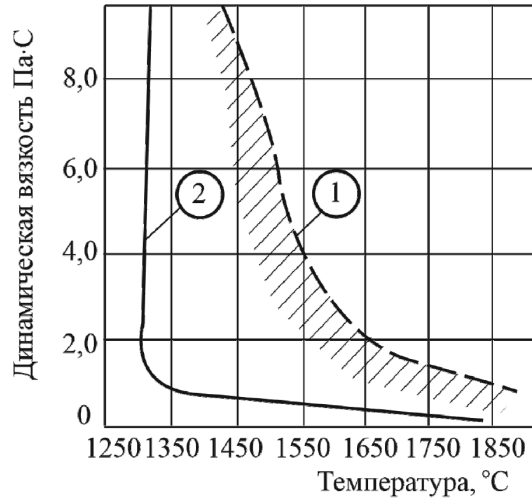
Ионную природу металлургических шлаковых расплавов впервые озвучил В. А. Ванюков, а О. А. Есин и позднее Э. В. Дюльдин представили жидкие шлаки как совокупность ионов Si^{4+}, Ca^{2+}, Al^{3+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, O^{2-}, F^{-} и другие [21, 22]. Теория сразу же дала ряд несоответствий, которые объяснить не смогла, в частности, в вопросе отличия зарядов атомных ионов по их валентности. Реальные шлаковые расплавы далеко не соответствуют идеальным ионным растворам и более всего представляются в виде строго упорядоченного расположения частиц, связанного с различиями в энергии их взаимодействия. Расплавленные шлаки обладают, по крайней мере, двумя видами упорядочения атомов и ионов: случайное соседство разноименных ионов и взаимно упорядоченное расположение анионов и катионов. Аналогично, катионная связь с кислородом может быть или ионная, или смешанная.

Все это вносит путаницу в ионную теорию. При этом практически отсутствуют исследования поведения шлаков при повышенных температурах (более 1750 °С), когда вязкость расплавленного шлака минимальна (рис. 6.2) и может быть сопоставима с вязкостью традиционных хорошо изученных солевых растворов. Тем более, что пока не установлена величина степени электролитической диссоциации шлаков, многие авторы допускают существование в жидких шлаках и нейтральных молекул, и химических соединений. Очевидная неоднородность жидких шлаков при исследуемых температурах не позволяет делать выводы о том, что традиционные электролитические свойства применимы к реальным доменным и вообще металлургическим шлакам.

Очевидно, что свойства электролита при высоких температурах будут несколько иными.

Это подтверждается зависимостью понижения динамической вязкости, с ростом температуры, от структурированности анионов

в шлаковом расплаве (рис. 6.3). Чем проще анионные радикалы, тем меньше вязкость расплава.

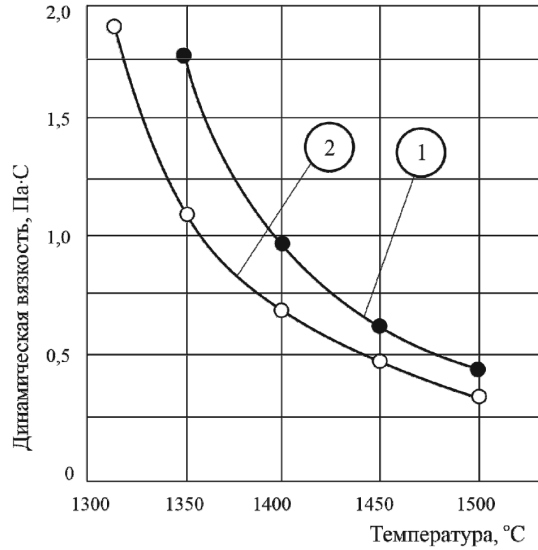


1 — при содержании $SiO_2 \approx 60\%$;
2 — при содержании $SiO_2 \approx 39\%$

Рисунок 6.2 — Температурная зависимость динамической вязкости расплавленного шлака (по данным работы [23])

Данные температурные зависимости следовало бы экстраполировать на температурный ряд от 1750 °С и выше. Но такие данные в литературе не встречаются.

Вскоре действительно появились работы, в которых авторы показывают на существование в шлаковых расплавах *при их стандартных температурах* не только ионов, но и молекулоподобных ассоциатов или комплексов, только частично диссоциированных на составляющие ионы кальция, магния, кремния, и др. компонентов. Второй составляющей шлакового раствора при этом являются, так называемые, термодинамически самоассоциированные растворы оксидов (по И. Пригожину) в виде субрегулярных ионных (катионных) растворов, разнесенных определенным образом в матрице ионов кислорода. Как правило, эти исследования проводились только с целью приспособить доменный шлак к нуждам повышения качества выпускаемого чугуна. Это существенно обедняет их для решения наших задач.



1 — анионные цепи (10% (мол));
2 — отдельные анионные радикалы (30%(мол))

Рисунок 6.3 — Зависимость динамической вязкости шлакового расплава от строения анионных радикалов (по данным работы [23])

В современной работе [24] утверждается существование процессов полимеризации ионов SiO_2, одновременное образование самоассоциативных мономерных и гетеромолекулярных комплексов. Авторы выделяют базовые комплексы, которые могут нас интересовать: $MnO - SiO_2$, $Al_2O_3 - SiO_2$, $SiO_2 - FeS$, $CaO - Al_2O_3 - SiO_2$, $CaF - CaO - CaP_2$, $MnO - Mn_3C$, $P_2O_5 - C - Fe_2P$ и др. Энтропия таких шлаковых групп существенно ниже, чем энтропия шлака, представляемого как полностью ионный раствор. По такой теории, шлаковый раствор состоит из полимерных образований, гетеромолекулярных ассоциатов и неассоциированных молекул отдельных компонентов, входящих в состав шлака, находящихся в постоянном динамическом равновесии, в полном соответствии с законом действия масс. Это может свидетельствовать о более организованной структуре металлургических шлаков и, значит, их более чувствительной способности к дифференциации на составляющие компоненты, ассоциирующие в химически более близком упорядочении. Правда, пока нет убедительных доказательств того,

что такие ассоциаты, время жизни которых, кстати, измеряется долями секунды, не являются ионообразующими. Для нас это важно с точки зрения использования электролитических свойств шлаков, обладающих высокой устойчивостью и жидкоплавкостью [25, 26]. Не вся система шлаковых составляющих может подлежать диссоциации в ионном растворе.

Таким образом, на сегодня известно, что шлаковые расплавы *в том диапазоне температур, который исследовался,* представляют собой особый тип сложных жидких электролитов, со сложной структурой, куда входят многокомпонентные комплексы ионов, субокислы различного состава, отдельные молекулы и ассоциаты.

Этот пример показывает, что для выделения хотя бы относительно чистых компонентов из металлургического шлака в некотором физико-химическом реакторе, необходимы более тщательные исследования, по крайней мере, поведения в условиях повышенных температур и низкой вязкости. Если удастся поднять температуру в нашем физико-химическом реакторе до тех пределов, когда вязкость шлака будет давать его понимание как жидкости с вязкостью в пределах 0,05 – 1,1 Па·с (см. рис. 6.2), то для такой жидкости можно в первом приближении применить характерные зависимости.

В случае, когда раствор содержит некоторое число ионов из номенклатуры металлургических шлаков, разница искомых энергий $\Delta Q = \{Q(n_2) - Q(n_1)\}$ или скрытая теплота плавления, является одним из параметров, который может использоваться для перегретых металлургических шлаков в качестве определяющего неравновесность этих систем. Поэтому сильно нагретый расплавленный шлак может являться объектом для некоторого энергетического воздействия с целью придания ему качеств полезного продукта. Для этого следует найти необходимую энергию, способ ее приложения к такому шлаку и техническое обеспечение такого процесса.

Поэтому нельзя не принимать во внимание возможности организации процессов электролитической диссоциации, которые при определенных условиях (прежде всего, высоких температурах расплавов) могут быть вариантом для решения проблемы разделения шлаковых составляющих. Например, не противоречит логике то, что в физико-химическом доменном реакторе теоретически можно:

– создать высокотемпературный электролизер с использованием электрической энергии на графитовых (?) электродах в полимодальном доменном реакторе;

– выделить наиболее реакционно-способные минералы и компоненты из состава исходной доменной шихты;

– обеспечить условия для активации поверхности высокотемпературного доменного шлака;

– обеспечить требуемую вязкость шлака для осуществления высокотемпературного электролиза;

– обеспечить обработку поверхности шлака раствором подходящей кислоты, с целью упорядочения его структуры.

Сегодня эти предложения могут показаться неактуальными и невыполнимыми. Тем не менее, опыт создания технологий электрошлакового переплава в институте сварки им. Е. О. Патона [27] свидетельствует о том, что существует как теоретическая, так и практическая основа для работы с жидкими электролитическими шлаками в электрическом поле и при температурах около 2500 °С [28, 29].

Необычность методов минимизации отходов в источнике возникновения, то есть в технологических процессах, заключается в том, что они представляют собой несколько иной смысл для любого технологического процесса [30, 31, 32]. Это связано, с одной стороны, с более тщательным отношением к используемому сырью, его компонентности и, с другой стороны, с более тщательным подбором источников энергии, которая используется в технологическом процессе. В основном эти два ресурса, которые ранее почти никогда не использовались в разработке технологических процессов, могут сыграть решающую роль в минимизации промышленных отходов.

Вернемся к нашему доменному процессу. Если принимать изложенные выше рассуждения, доменная печь должна быть превращена в некоторый физико-химический реактор (*R*) (см. рис. 6.1, б), в котором происходит функциональное разделение многокомпонентного сырья (*S*) в виде доменной руды, флюсовых присадок и кокса на отдельные составляющие: некоторые соединения кремния, серы, фосфора, отдельно — мышьяк, отдельно другие составляющие рудного материала (табл. 6.3). В этом случае условная количественная составляющая полезной товарной продукции (*P*) могла бы достигать 88–95% по весу от используемой руды, кокса и присадок. В этом

случае, доменное производство вместо 45% сырья переводило бы в отходы всего 5–10% этого сырья в виде «пока» не перерабатываемой его части. В частности, в таком реакторе можно использовать высокотемпературные электролитические или химические (связанные с каталитическими процессами) источники энергии. Да, их надо еще разработать, но «игра стоит свеч». По существу, мы говорим о известных способах (*W*) минимизации отходов в источнике их появления, т.е. в самом технологическом процессе. Заманчивая идея!

Мы остаемся уверенными, в том, что предлагаемую полимодальную технологическую идеологию воспримут далеко не все. Тем более, что реальных примеров пока еще весьма мало. Кому-то она покажется надуманной, кто-то не согласится с доминантой на полимодальные технологии, посчитав их ненужными, лишними, принимая во внимание только утилитарные задачи получения прямой полезной продукции. Традиционные специалисты, технологи, основной задачей которых на протяжении многих лет было совершенствование существующих технологий и доведение технологических показателей до уровня максимальной производительности, до максимального уровня качества основной продукции, посчитают кощунственным вмешательством в традиционные технологии.

Спешим успокоить сторонников технологий параллельного производства и полезной продукции, и отходов. Несмотря на существование в мире уже шестого технологического уклада, большая часть товарной продукции и предметов потребления изготавливается по технологиям пятого, четвертого и даже третьего технологических укладов, и общество пока не научилось **ни эффективно справляться с отходами** хотя бы в одном из существующих технологических укладов, ни минимизировать их до уровня, безопасного для окружающей среды. И если традиционные технологии существуют многие столетия и даже тысячелетия, и они, по существу, отвечают сегодня за загрязнение окружающей среды, то новые идеологии в технологических укладах еще длительное время будут пробивать себе дорогу. Но за ними перспектива. Она связана с существованием человечества, а ему альтернативы быть не может. По крайней мере, для самих людей.

Таблица 6.3 — Прогнозируемые данные по распределению типичных компонентов сырьевой базы полимодального доменного процесса между товарной продукцией и отходом, приведенному к относительным количественным показателям товарного чугуна,%

Компоненты сырьевой базы	Содержание компонента в исходном сырье	Типичная технология		Полимодальная технология*	
		Товарная продукция	Промышленный отход	Товарная продукция	Промышленный отход
Железо	16–72	60	–	60	–
Кремний	8–10 и более	–	25–30	23–28	~2
Фосфор руды Фосфор кокса	0,15 0,015–0,04	– –	0,1–0,25 0,03–0,05	0,15 0,01–0,04	– –
Углерод кокса	80–88	3–4	–	3–3,5	0,5
Сера руды Сера кокса	0,1–0,3 0,5–1,8	– –	0,11–0,25 0,05–0,10	0,2 –	– –
Мышьяк	0,05–0,09	–	0,03–0,05	0,01–0,05	–
CaO известняка SiO_2 известняка	55 45	– –	3–4 2,5–3,0	~2 ~1	– –
Зола кокса	8–12	–	8–10	–	5–11
ВСЕГО:	–	63–64	33,3–40,7	89,37–94,9	7,5–13,5

* — оценочные варианты распределения компонентов, принимающих участие в технологическом процессе, если в нем будут присутствовать полимодальные технологии.

Заключение

Мы исходим из известного постулата: не зная самого явления, невозможно эффективно им управлять. *Не имея точного механизма явления, благодаря которому в производственных системах появляется отход, нельзя утверждать, что мы способны оптимально управлять этим отходом, минимизировать его, качественно перерабатывать.* Поэтому любые уточняющие или существенно изменяющие сведения в этой области становятся крайне интересными для того, чтобы более тщательно изучить механизмы происхождения отходов в самых различных производящих системах. Существенный интерес проявляется к любым системным результатам, которые могут носить универсальный характер для любых технологий, например, представленные в данной работе: термодинамическое двуединство технологического процесса по отношению к сырью; компонентное структурирование сырьевого потока; определение технологически эффективных источников энергии для целенаправленной переработки *всех* компонентов такого потока; источники энергии, оптимально вписывающиеся в существующий технологический процесс, и многие другие.

Внимание, которое уделено здесь вопросам термодинамики процессов отходообразования, связано именно с желанием отыскать и изучить объективные свойства этих процессов в самых различных производственных системах, которые дадут основание для систематизации главных причин происхождения отходов. Небезосновательно автор принимает за основу именно энергетику, лежащую в основе получения как полезной продукции, так и отхода.

Неразрывное термодинамическое двуединство, характерное для воздействия отдельных источников энергии на различные компоненты сырья, является основой любой из существующих технологий. Поэтому законы энергоэнтропики, поясняющие многое из природы отходообразования, присутствуют в нашем анализе в качестве основополагающих.

По-прежнему, уже в XXI веке, мы видим нежелание ученых в области прикладных наук, специалистов-технологов уйти от стереотипов: главным для них по-прежнему остается внимание к получению того продукта, ради которого создано данное производство.

Вне какой-либо привязки к многокомпонентности исходного сырья, одного из наиболее важных и главных качеств, являющихся ответственными за отходообразование. И вне всякой оглядки на качество используемой энергии, как основы для переработки всех компонентов сырья. И вне всякой привязки к особенностям эффективности используемых источников энергии. Эти две причины — многокомпонентность сырья и поливариантность используемых источников энергии, их требуемая согласованность, как основа минимизации отходов, пока не являются доминирующими ни для создателей абсолютного большинства современных технологий, ни для авторов патентов на новые технологические процессы, ни для технологов, успешно эксплуатирующих эти новые производства. Не говоря о традиционных, годами устоявшихся технологиях, которые опять-таки, являются высокоотходными и способствуют угнетению среды обитания не только человека, но и всего живого на Земле.

Автор не может претендовать на полноту объема исследований в области механизмов происхождения отходов хотя бы потому, что такие мировоззренческие предметы исследуются более широко и с самых различных сторон. Однако, следует надеяться, что постепенно эти предметы найдут свое место и станут доминирующими в сознании человечества, если иметь в виду глобальное негативное влияние отходов на природную среду, на возможности существования человека в этой среде, если учитывать их реальную опасность, заключающуюся в потере привычной среды обитания для человека. Значимость этих явлений несоизмеримо высока по отношению к той минимальной сумме знаний, которой обладает человечество в этой области — области знаний о происхождении отходов.

Можно утверждать, что найдется не много областей знаний, тем более основополагающих для самого существования человека на Земле, которые были бы так слабо изучены, как теория и методология происхождения отходов. Парадоксальной при этом является почти полная очевидность и кажущаяся простота собственно таких процессов. Эти факторы от имени Природы уже сегодня играют злую шутку с человечеством, поставив его перед безальтернативным выбором, а завтра они же могут поставить перед человеком угрозу потери привычной среды обитания. Недаром великий прорицатель, писатель, ученый Г. С. Альтшуллер еще 50 лет тому небезоснова-

тельно фантазировал о бесприродном технизированном мире для человечества. Есть опасение, что этот мир уже наступает.

И, по-прежнему, следует быть уверенными, что только по-настоящему объективные знания в области таких явлений, как природа происхождения отходов, имеющие признанные связи с целенаправленными проявлениями человеческой активности, наряду с процессами производственной деятельности, а именно, трудовым, техническим и технологическим их наполнением, могут дать ответ на многочисленные вопросы — что делать и как избавляться от неизбежных отходов, сопутствующих любому производству. Собственно глобальность процессов производства и равнозначная при этом глобальность процессов получения отходов дает нам понимание того, что к этим явлениям следует относиться не как к «надоевшей мухе», от которой как-то надо отбиваться, а как к объективному и крайне затратному процессу, в смысловом аспекте приравниваемому к мировоззренческим знаниям и современным технологиям. К этому подталкивает содержание настоящей книги, которая в подобном плане будет полезна читателю. По крайней мере, автор рассчитывает на это. Следует быть убежденными, что такие механизмы и причинно-следственные связи в технологических процессах однозначно отражают пути и направления, по которым необходимо развивать технологии завтрашнего дня, технологии, которые, по терминологии Гюнтера Паули, дают важный импульс в развитии «синей экономики».

Работа носит характер полемического материала, который автор выносит на обсуждение всеми заинтересованными учеными с целью уточнения и развития сущности явлений, лежащих в основе природы происхождения отходов, как феномена, относящегося к человеческой деятельности.

Многочисленность научных направлений, которые связывают с термодинамикой, сегодня впечатляет. Причем, даже в тех областях, которые мало относятся к энергетике. Тем не менее, любые технологические процессы, связанные с использованием энергии различных видов, следует относить к таким направлениям. Даже несмотря на то, что оно имеет крайне мало своих устойчивых последователей в сфере прикладной инженерии, среди специалистов в технических науках, тех, кто отвечает за эффективность

разрабатываемых технологий получения самых различных товарных продуктов. Сегодня необходимы не только знания в области природы и механизмов происхождения отходов. Крайне важно формирование новой технологической психологии в прикладной инженерии. Важна и соответствующая законодательная база, в том числе, на международном уровне, ограничивающая создание традиционных технологий, ориентированных только на получение товарной продукции и никак не ориентированных на другие компоненты исходной сырьевой базы, спонтанно превращающиеся в ненужные отходы. Представленные исследования дают уверенность в том, что такие подходы к существующим технологиям являются одними из наиболее эффективных способов минимизации отходов, а именно, посредством их подавления в источнике возникновения.

Безусловно, подобный материал не может претендовать на исчерпаемость рассматриваемых здесь и сопутствующих им вопросов. По мере накопления дополнительных знаний в области термодинамики отходообразования они могут быть использованы в последующих исследованиях в области методологии происхождения отходов. И в заключении хотелось выразить надежду на то, что книга вызовет у читателя желание поразмыслить над сутью поднятых в ней проблем. Уверен, что они того стоят. Еще раз надеюсь на понимание и любознательность нашего читателя.

Литература

Литература к 2-й главе

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / под ред. Ю. А. Чизмаджаева. Изд. 2-е. М. : Едиториал УРСС, 2003. 280 с.
2. Onsager L., Phys. Rev., 1931. № 37. P. 405.
3. Prigogine I. Non-Equilibrium Thermodynamics, Variational Techniques and Stability. Univers. Of Chicago and London, 1965. 184 p.
4. Monnevile P. Dissipativ Structures and Weak Turbulence. Academic Press, London, 1990. 72 p.
5. Алексеев Г. А. Энергоэнтропика. М. : Знание, 1983. 192 с.
6. Хокинг С. Краткие ответы на большие вопросы. Изд. «Apgads Mantojums». Рига Латвия — 2016. 144 с.
7. Пригожин И., Стингерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой : пер. с англ. / общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. Изд. 5-е. М. : КомКнига, 2005. 296 с.
8. Cahn R. W. Physical Metallurgy, University of Sussex, England, 1965.
9. Коттрелл А. Строение металлов и сплавов. М. : Металлургиздат, 1961. С. 196–201.
10. Веденяпин В. В., Аджиев С. З. Энтропия по Больцману и Пуанкаре. *Успехи математических наук*. Т. 69, вып. 6 (420). 2014. С. 45–80.
11. Micadei K., Peterson J., Souza A. and oth. Reversing the direction of heat flow using quantum correlations. Quantum Physics. URL: //https://arxiv.org/abs/1711.03323
12. S. W. Hawking. Black hole explosions? *Nature*. 1974-03-01. Т. 248. С. 30–31.
13. S. W. Hawking. Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics*. 1975-08-01. Т. 43. С. 199–220.
14. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация. (Изд. 2-е стереотипное : пер. с англ. И. В. Кузнецова). М. : Изд. Ком Книга, 2006. 272 с.
15. Переписать второй закон термодинамики и выжить. URL: https://habr.com/ru/company/skillfactory/blog/675948/
16. Abdel-Khalik A. R. The Entropy Law, Accounting Data, and Relevance to Decision-Making. *Accounting Review*. April 1974. Vol. 49. № 2. Pp. 271–283.
17. Blinder A. S. Financial Entropy and the Optimality of Over-Regulation Griswold Center for Economic Policy Studies. Working Paper № 242. November 2014. 32 p.

18. Ustinova Y. The Measurement and Management of the Accounting System Entropy Level. *Учет и отчетность*. 2018. № 62. С. 41–49.
19. Penrose R. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. New York: Knopf, 2005. 1099 p.
20. Ракин В. И. Энтропия как интеллектуальный оселок для исследователя. Управление наукой: теория и практика. 2022. Т. 4. №1. С. 54–67.

Литература к 3-й главе

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / под ред. Ю. А. Чизмаджаева. Изд. 2-е. М. : Едиториал УРСС, 2003. 280 с.
2. Onsager L., Phys. Rev., 1931. № 37. P. 405.
3. Prigogine I. Non-Equilibrium Thermodynamics, Variational Techniques and Stability. Univers. of Chicago and London, 1965. 184 p.
4. Monnevile P. Dissipativ Structures and Weak Turbulence. Academic Press, London, 1990. 72 p.
5. Алексеев Г. А. Энергоэнтропика. М. : Знание, 1983. 192 с.
6. Переписать второй закон термодинамики и выжить. URL: https://habr.com/ru/company/skillfactory/blog/675948/
7. Пригожин И., Стингерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой : пер. с англ. / общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. Изд. 5-е. М. : КомКнига, 2005. 296 с.
8. Пригожин И. Р. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках : пер с англ. / Общ. ред. Ю. Л. Климонтовича. Изд. 3-е. М. : КомКнига, 2006. 296 с.
9. Пригожин И. Р. Неравновесная статистическая механика Изд. 3-е / пер. с англ. В. А. Белоконя и В. А. Угарова; под ред. Д. Н. Зубарева. М. : Мир, 1964. 314 с.
10. Волошин В. С. Место отходообразования в термодинамическом многообразии производственных систем. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : зб. наук. статей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 11–15 вересня 2017 р.). Х. : Райдер, 2017. С. 94–100.
11. May Robert M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*. 261 459-67. 1976. P. 85–93.
12. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения. М. : Мир, 1980. 607 с.
13. Малюк А. А. Энтропийный подход к моделированию систем и процессов защиты информации. *Безопасность информационных технологий*. 2011. № 4. С. 15–19.

14. Металлургия стали / под ред. В. И. Явойского, Г. Н. Ойкса. М. : Металлургия, 1973. 816 с.
15. Квашнин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация. М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. 392 с.

Литература к 5-й главе

1. Евстигнеева Л. П., Евстигнеев Р. Н. Экономика как синергетическая система. РАН. Ин-т экономики. Изд. 2-е. М. : ЛИБРОКОМ, 2010. 266 с.
2. Корольков Б. П. Термодинамические основы самоорганизации : монография. Иркутск : ИрГУПС, 2011. 120 с.
3. Волошин В. С. К вопросу о понимании процессов подавления отходообразования в источнике возникновения. *Вісник Приазовського державного технічного університету* : зб. наукових праць / ПДТУ. Маріуполь, 2016. Вип. 33. С. 206–213. (Серія : Технічні науки).
4. Steel Industry Co-products. Fact Sheet / World Steel Association. URL: www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1b916a6d-06fd-4e84-b35d-c1d911d18df4 2016pdf.
5. Потапнев М. П. Аутофагия, апоптоз, некроз клеток и иммунное распознавание своего и чужого. Минск : Иммунология. № 2. 2014. С. 95–102.
6. Mintern J. D., Villadangos J. A. Autophagy and mechanisms of effective immunity. Front. Immunol. 2012; 3: 60.
7. Underhill D. M., Goodridge H. S. Information processing during phagocytosis. *Nature Rev. Immunol*. 2012; 12 (7): 492–502.
8. Kono H., Rock K. L. How dying cells alert the immune system to danger. *Nature Rev. Immunol*. 2008; 8 (4): 279–89.

Литература к 6-й главе

1. Statistics / The European Association representing Metallurgical Slag producers and processors. 2016.
2. Довкілля України за 2016 рік: статистичний збірник / державна служба статистики України. К., 2017. С. 111–112.
3. Краснянский М. Е. Утилизация и рекуперация отходов : уч. пособие. 2-е изд. Харьков : Бурун Книга, 2007. С. 37.
4. Филоненко А. В. Повышение эффективности утилизации крупнотоннажных промышленных отходов на предприятиях черной металлургии Украины. *Экология и промышленность*. № 2. 2019. С. 78–89.

5. Смирнов А. А., Шичков А. Н. Организация раскроя листового металла с учетом деловых материальных ресурсов на машиностроительном предприятии. Вестник ЮРГТУ (НПИ). 2017. № 4. С. 22–33.
6. Валиахметова Ю. И., Филиппова А. С. Теория оптимального использования ресурсов Л. В. Канторовича в задачах раскроя упаковки: обзор и история развития методов решения. *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. 2014. № 1. С. 186–197.
7. Калмыкова Ю. С., Хоботова Э. Б., Толмачев С. Н., Уханева М. И. Отвальный доменный шлак как техногенное сырье для производства вяжущих материалов. *Экология и промышленность*. № 4. УкрГНТЦ «Энергосталь». Харьков, 2011. С. 102–109.
8. Шлаки черной металлургии. Тематич. отраслевой сборник / под ред.: Л. А. Смирнова, А. А. Дерябина. УралНИИЧерМет, Свердловск, 1990. 110 с.
9. Панишев Н. В., Бигеев В. А., Черняев А. А. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна с извлечением цинка. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова.* 2013. № 4. С. 26–29.
10. Семиноженко В. П., Сталинский Д. В., Касимов А. М. Промышленные отходы: проблемы и пути решения. Индустрия, Харьков. 2011. 544 с.
11. Калмыкова Ю. С. Применение отвальных доменных шлаков с получением шлакощелочных вяжущих. *Экология и промышленность России*. № 3. 2014. С. 21–25.
12. Экономическая эффективность припечного способа переработки доменных шлаков / Р. А. Менаджиев, А. В. Паршаков. *Шлаки черной металлургии, их переработка и использование.* Тематич. отраслевой сб. под ред. Л. А. Смирнова. Свердловск, УралНИИчермет. 1990. С. 15–19.
13. Сержанов Г. М., Шевко В. М., Лавров Б. А., Аманов Д. Д. Термодинамическое восстановление кремния из оксида алюминием. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* 2015. № 11-2. С. 161–166. URL: https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7698.
14. Дюльдина Э. В., Кочержинская Ю. В. Физикохимия доменных шлаков. Известия Челябинского научного центра. 2003. Вып. 4 (21). С. 96–104.
15. Иванов О. С., Рыбак В. Н. Математическое моделирование удельного электрического сопротивления шлаков ЭШП. *Литье и металлы.* № 1 (88). 2017.

16. Сотников А. И. Строение границы металл-оксидный расплав и особенности электрохимических методов в металлургических системах. *Физико-химические исследования металлургических процессов.* Вып. 2. Свердловск : УПИ, 1964. С. 40–49.
17. Mills K. C., Yuan I., Jones R. T. Estimating the physical properties of slag. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011. Vol. 111. P. 649–658.
18. Шалимов М. П. Компьютерное моделирование электрохимических экспериментов. *Высокотемпературные расплавы*. № 1. 1997. С. 94–98.
19. Добрынина Н. Ю., Барбина Т. М., Ватолин А. Н. Электрохимия расплавов : учебное пособие. Изд. Уральский университет, 2018. 349 с.
20. Утелбаев Б. Т., Алшимбаева Д. У., Сулецменов Э. Н. Электропроводность металлургических шлаков при фазовых переходах. *Наука и мир*. Т. 1. № 11 (27). С. 41–44.
21. Есин О. А., Гельд Н. В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 2. Изд. 2-е. М. : Металлургия, 1966. 703 с.
22. Циватая Н. А. Современные взгляды на строение металлургических шлаков. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб. науч. тр. Днепропетровск : ИЧМ НАН Украины, 2014. Вып. 28. С. 223–240.
23. Жило Н. Л. Формирование и свойства доменных шлаков. М. : Металлургия, 1974, 120 с.
24. Зайцев А. И., Шахпазов Е. Х. Развитие современной теории металлургических шлаков. *Вестник Казанского технологического университета.* 2010. С. 153–159.
25. Васильев В. Е. Доменная плавка на устойчивых шлаках. Киев : Укртехиздат. 1956. 260 с.
26. Свойства жидких шлаков / Воскобойников В. Г., Дунаев Н. Е., Михалевич А. Г. и др. М. : Металлургия. 1975. 184 с.
27. Латаш Ю. В., Медовар Б. И. Электрошлаковый переплав, М., 1970. 240 с.
28. Казачков Е. А., Чепурной А. Д. Электрошлаковый переплав. Ч. 1. Мариуполь : ПГТУ, 1995. 83 с.
29. Чуманов В. И., Чуманов И. В. Повышение эффективности электрошлакового процесса и улучшение качества металла вращением расходуемого электрода. *Электрометаллургия*. № 9. 2009. С. 36–41.
30. Волошин В. С. Пять тезисов в теорию и методологию управления отходами (по материалам книги «Природа отходообразования»). *Вісник Приазовського державного технічного університету* : зб. наук. праць / ПДТУ. Маріуполь, 2010. Вип. 21. С. 136–140. (Серія : Технічні науки).

31. Волошин В. С. Перспективы методологий подавления отходов в источнике их возникновения. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : зб. наук. статей XV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 9–13 вересня 2019 р.). ПП «Стиль-Іздат», 2019. С. 94–98.
32. Волошин В. С. К вопросу о понимании процессов подавления отходообразования в источнике возникновения. *Вісник Приазовського державного технічного університету* : зб. наукових праць / ПДТУ. Маріуполь, 2016. Вип. 33. С. 206–213. (Серія : Технічні науки).

Научное издание

В. С. ВОЛОШИН

ОТХОДЫ и ТЕРМОДИНАМИКА

Ответств. за выпуск Кришталь А. И.
Верстка Кришталь А. И.
Оформление обложки Долгая М. В.

Подписано в печать 18.06.2024 г.
Формат 60x84/16. Бумага офсет.
Усл. печ. л. 4,88.
Тираж 300 шт.

ФОП Самченко Анастасия Михайловна
Свидетельство о внесении субъекта издательского дела
в государственный реестр издателей, изготовителей
и распространителей издательской продукции
ДК №7906 от 03.08.2023 г.
Тел. (093) 860-62-21.