

## Лекция 9.

### О применениях электродуговых плазмотронов в металлургии и теплоэнергетических установках

Применения ЭДП в современной металлургии и литейном производстве неизменно сопровождаются интенсификацией технологических процессов и повышением качества выплавленного металла. Плазмотроны используются при переработке рудного сырья, в технологиях получения высокоогнеупорного сырья из тугоплавких материалов, для повышения температуры в мартеновских печах, при выплавке специальных сталей и сплавов и т.д. [112 и др.].

В металлургических процессах электродуговая плазма является независимым источником тепла. Особо ценным качеством плазмотронов, наряду с высокой температурой плазменной струи, является возможность создавать в реакционном объеме окислительную, восстановительную или химически нейтральную среду с высокой активностью частиц, способствующих интенсификации газообменных процессов. Плазменная технология позволила заменить многостадийный процесс получения металлов из руд процессами прямого их восстановления [121]. Применение плазмотронов в технологии выплавки слитков титана привело к повышению выхода конечного продукта на 15%, уменьшило отходы и улучшило качество поверхности слитков. Особо велика положительная роль технологии *плазменно-дугового переплава*, которая позволила сохранить тысячи тонн ценного металлургического сырья [112].

Интенсификация металлургических процессов и повышение их производительности обусловлены, в первую очередь, воздействием концентрированных потоков энергии. На рис. 8.4

приведены типичные схемы плазменно-дуговых печей. В металлургическом производстве используются в основном плазмотроны с вынесенной дугой, где в качестве анода работает переплавляемый металл. Количество тепловой

энергии, выделяемой в печи, находится в прямой зависимости от длины положительного столба дуги и мощности ЭДП. В случае, когда необходимо обеспечить "мягкий" нагрев больших масс материала, в качестве источника

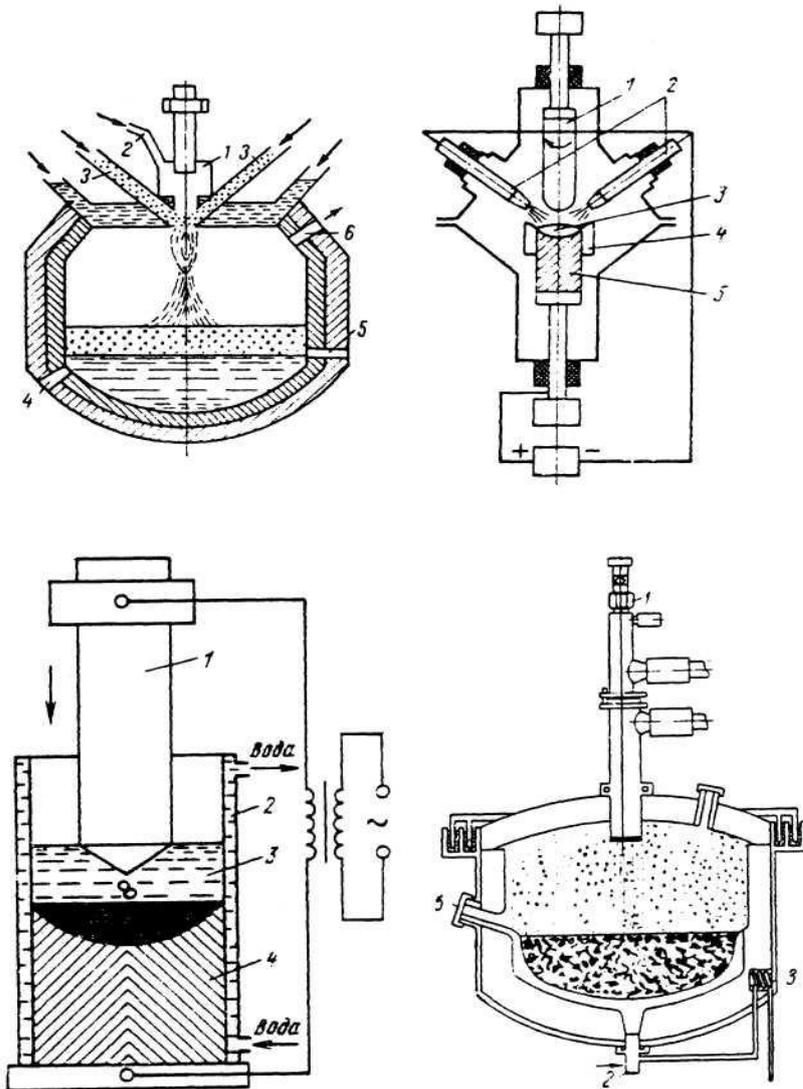


рис. 8.4. Типичные схемы плазменно-дуговых печей.

тепла используют плазменную струю. Химический состав плазменной струи и ее температуру можно легко контролировать в течение процесса плавки.

Особо отметим плазменную технологию азотирования стали в металлургии. В расплав стали вдувают термическую плазму азота, что ведет к более интенсивному процессу растворения азота в металле. При этом стали насыщаются азотом равномерно по всему объему, что ведет к росту

прочности. Такая технология используется при получении прочных нержавеющей а у стеничных сталей.

Применение ЭДП для повышения температуры доменных и мартеновских печей позволило значительно повысить производительность печей и добиться экономии топлива за счет увеличения полноты сгорания исходного топлива и теплопередачи от факела. Так, например, применение ЭДП позволяет повысить рабочую температуру в печи с 2000 до 4000° С.

В большинстве случаев в качестве плазмообразующего газа при выплавке и рафинировании металлов используют аргон, а крупных металлургических заводах аргон получают как побочный продукт на кислородных станциях. Однако стоимость аргона для производства остается довольно высокой. В ряде случаев становится возможным заменить аргон более дешевым азотом или использовать смеси этих газов, иногда применяют и водород. Обычно, технологически необходимый расход плазмообразующего газа составляет от 7 до 16 л в мицуту на 100 кВт мощности плазмотрона.

В зависимости от задач, в производстве применяются ЭДП различной мощности, от 100 кВт до 2 МВт. Для металлургических процессов пригодны практически любые ЭДП, выпускаемые промышленностью. Среди плазмотронов, выпускаемых западными фирмами, следует упомянуть промышленные плазмотроны фирмы Thermal Dynamics Corp. (США), а также плазмотроны ряда фирм стран с высоким уровнем развития металлургии (Германия и Япония).

Электрическая дуга и потоки термической плазмы применяются для повышения эффективности работы теплоэнергетических установок путем интенсификации процессов сгорания газовых, жидких и твердых топлив. Одним из первых примеров такого применения стало, видимо, создание топливно-плазменных горелок для нужд металлургии (рис. 8.5) [121].

Рассмотрим механизм действия такой горелки. В зоне горения топливно-кислородной смеси помещают электроды — анод и катод — изаигают дуговой разряд небольшой силы тока ( $I = 20\text{—}40\text{ A}$ ). В результате дополнительного выделения электрической энергии температура газовой смеси возрастает. Известно, что максимальная температура пламени обычной газовой горелки не превышает 2 тыс К. При пропускании через пламя электрического тока температуру потока газа можно увеличить более чем вдвое. Например, если в зоне горения горелки мощностью 50 кВт подключить электрическую дугу

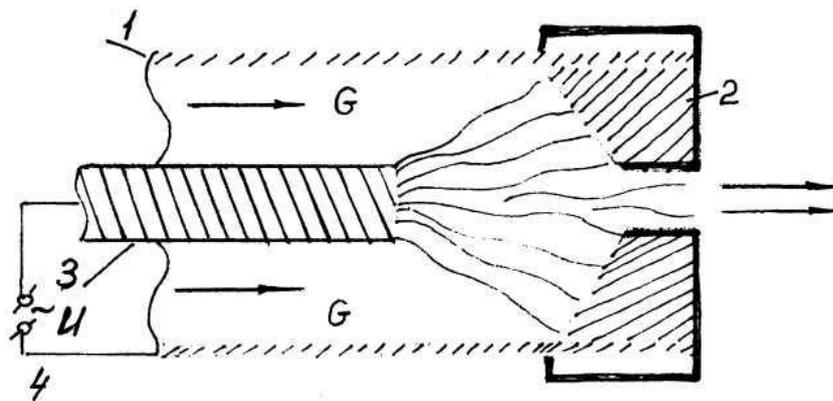


рис. 8.5. Схема горелки для топливно-воздушной смеси с подогревом пламени электрической дугой: 1- трубчатый электрод; 2 – охлаждаемое сопло; 3 – центральный электрод; 4 – источник электропитания.

такой же мощности, то температура потока кислородно-газовой смеси и его теплосодержание возрастают более чем в 2 раза. Здесь дополнительная тепловая энергия получается за счет повышения полноты сгорания топлива с ростом температуры, поэтому такой результат нельзя получить, используя одну горелку мощностью в 100 кВт. Кроме того, повышение полноты сгорания исходного топлива при повышенных температурах дает значительный экологический эффект, так как при этом уменьшается образование в выбросах токсичных азотных соединений.

Одной из причин наблюдаемых эффектов является интенсивная газификация твердых и жидких топлив (угля, мазута и др.) при воздействии потока плазмы. При этом выделяется большое количество углеводородов в газовой фазе, являющихся прекрасным топливом.

По оценкам экспертов, в перспективе основную долю органического твердого топлива будут составлять низкосортные бурые и каменные угли с высоким содержанием золы и серы. Одной из реальных эффективных технологий их использования является *плазменная газификация*. Например, при термохимической переработке угля в потоке плазмы аргона выделяется более 70% синтез-газа, остальную часть составляют углеводороды и немного СО. Твердые остатки обычно не содержат смолистых веществ и высших углеводородов [124—126].

Следует также отметить, что в теплоэнергетических установках, работающих на низкосортном топливе, имеют место различного рода неустойчивости горения. Применение ЭДП позволяет стабилизировать процессы горения путем подавления возникающих возмущений [127].

Таким образом, использование потоков электродуговой плазмы позволило повысить устойчивость и производительность теплоэнергетических установок, использующих для сжигания угли, особенно низкосортные. Вдувание потока плазмы ведет к росту концентрации химически активных компонентов и общему повышению температуры в топке. При этом интенсифицируются процессы газификации угля с выделением большого количества летучих углеводородов, метана, ацетилена и других, которые, сгорая, выделяют большее количество тепловой энергии. Отходящие газы таких топок не содержат смолистых веществ и экологически вредных азотных и сернистых соединений. Разработками и внедрениями плазменных технологий получения топливного газа из угля, торфа и различных органических отходов занимается ряд фирм в США, Германии и Швеции. Сведения о деятельности этих фирм можно получить из работы [125]. По оценкам специалистов, стоимость такого топлива сопоставима со стоимостью нефти, импортируемой в США.

## **Физические основы плазмохимических реакций и технологий**

В настоящее время плазмохимия стала самостоятельным разделом химической науки, а прикладная плазмохимия превратилась в перспективную область химической технологии.

Химические реакции, протекающие в условиях низкотемпературной плазмы, относятся к быстрым реакциям, скорости которых соизмеримы со скоростями релаксационных процессов. Например, в интервале температур от 3 тыс. К до 15 тыс. К среднее время межмолекулярного взаимодействия —  $10^{-14}$  с, среднее время свободного пробега молекул —  $10^9$  с, а среднее время колебательной релаксации —  $10^{-7}$  с. При таких энергиях и скоростях взаимодействия уже трудно отделить физическую кинетику от химической кинетики [128]. По этой причине при теоретических исследованиях элементарную химическую реакцию в условиях НТП необходимо рассматривать как совокупность элементарных процессов взаимодействия микроскопических частиц с соответствующими сечениями столкновений. В связи с этим основой теоретического описания плазмохимической реакции является микроскопическое описание с учетом всего многообразия кинетических процессов.

Разработанные на основе плазмохимических реакций плазмохимические технологии переработки материалов отличаются от традиционных химических технологий высокой плотностью энергии, вкладываемой в химическую систему, действием электрического и магнитного полей, а также излучения. В этих условиях резко возрастают активности химических компонентов, скорости протекания реакций и, следовательно, производительность технологического процесса.

## 1. Плазмохимическая установка

Независимо от вида плазмохимических реакций, типа процесса и области промышленности, где используется плазменная технология, плазмохимическая установка конструктивно состоит из следующих основных частей: плазмотрон; реактор; закалочное устройство; система электропитания; система снабжения плазмообразующим газом; система подачи химического сырья; система охлаждения теплонапряженных элементов конструкции; система управления процессом, контроля и изменения электрических, тепловых, газодинамических параметров химического состава. Блок-схема плазмохимической установки приведена



Рис. 8.6. Блок-схема плазмохимической установки

Реализовать плазмохимический процесс можно тремя путями:

1. Нагрев холодной смеси реагентов в зоне электрического разряда.
2. Смешение холодных реагентов в плазменной струе.
3. Смешение реагентов в реакторе в плазменном состоянии.

Независимо от способа проведения, плазмохимический процесс протекает с высокой скоростью в пространственно неоднородной и неизотермической среде. Типичные времена протекания реакций в плазме лежат в интервале  $10^{-5}$  с —  $10^3$  с [128].

Плазмохимический процесс можно разделить на две стадии. В первой стадии происходит разогрев химических реагентов и реализуются химические реакции с образованием целевого продукта. В объеме плазмохимического реактора процессы протекают таким образом, чтобы химическое равновесие было смещено в сторону образования полезного продукта. Во второй стадии происходит быстрое охлаждение продуктов реакций, с целью сохранить целевой продукт от термического разложения. Эта стадия называется *закалкой*, поэтому закалочное устройство играет важную роль в плазмохимической установке.

В общем случае, закалка может быть абсолютной, идеальной или сверхидеальной [23]. Если закалка абсолютная, то количество целевого продукта, полученное на первой стадии, не увеличивается и не уменьшается, т.е. не изменяется. Все промежуточные вещества (свободные атомы, ионы, радикалы) полностью преобразуются в закалочном устройстве в исходные соединения.

Закалка считается идеальной, если при охлаждении не меняется степень превращения в целевой продукт веществ, образовавшихся при температуре и давлении реакции из исходного продукта. При этом количество целевого продукта, полученного на первой стадии, сохраняется, а оставшиеся реагенты соединяются в иные продукты реакции.

Сверхидеальная закалка реализуется тогда, когда в закалочном устройстве происходит увеличение выхода целевого продукта, полученного на первой стадии плазмохимического процесса. Это может произойти за счет энергии, запасенной на внутренних степенях свободы химически реагирующих компонентов.

Как видно, основной задачей закалочного устройства является замораживание развития химического процесса на определенной (заданной) стадии, когда достигается максимум выхода полезного продукта. Требуемая скорость закалки определяется особенностями кинетики плазменного процесса и его механизмом. Исследования показали: чем выше скорость протекания реакции, тем выше должна быть скорость закалки. Например, в оптимальном процессе получения ацетилена из метана скорость закалки должна быть  $\sim 10^6$  К/с.

В зависимости от конкретного вида процесса может быть реализован тот или иной вид закалки. При этом закалочное устройство конструируют таким образом, чтобы достичь предельно возможной энергетической эффективности заданного плазмохимического процесса.

Тип плазмотрона и конструкцию плазмохимического реактора выбирают в зависимости от поставленных задач. Для крупнотоннажного химического производства представляют интерес процессы, протекающие при атмосферном давлении и выше. В этих условиях устойчиво работают в основном электродуговые плазмотроны. Если реакции протекают при пониженных давлениях, например, в условиях тлеющего или ВЧ разрядов, то разрядная камера плазмотрона выполняет функции реактора. Как видно, здесь в объеме РК плазмотрона осуществляется первая стадия плазмохимического процесса, т.е. происходит генерация плазмы, смешение химических реагентов и реализация плазмохимического процесса в заданном направлении.

Устройства, в которых происходят целенаправленные физико-химические превращения вещества в условиях низкотемпературной **плазмы, называются плазмохимическими реакторами**. В настоящее время сконструированы и используются в промышленности реакторы самых различных схем и конструкций, предназначенные для различных процессов. Классифицируют плазмохимические реакторы по различным признакам: по числу фазовых состояний вещества, реагирующих в объеме (гомогенные, гетерогенные); по принципу относительного движения сырья и теплоносителя (прямоточные или противоточные); по геометрии канала (цилиндрические, конические, диффузорного типа и др.) и т.д. [129].

Для конкретного вида плазмохимического процесса применяют свою схему и конструкцию реактора. В настоящее время единой теории, позволяющей рассчитывать параметры реактора для заданного процесса, не существует. Поэтому при выборе оптимального реактора

определяющую роль играют результаты экспериментальных исследований.

Одним из основных требований к конструкции реактора является обеспечение оптимальных процессов тепло- и массообмена при смешении теплоносителя и химических реагентов в объеме реактора. Качество смешения химических реагентов с потоком плазмы и оптимизация времени пребывания смеси в объеме реактора являются

весьма важными для плазмохимической установки. От этого во многом зависит энергетическая эффективность протекания плазмохимического процесса

С целью оптимизации процессов смешения используют различные смесительные устройства. Так, например, газовые смеси вводят в реактор через систему отверстий в виде поперечных, закрученных или спутно-поперечных струй. Жидкое сырье распыляют в реакторе через форсунки также различным образом, а реагенты в твердой фазе подают спутно, с потоком плазмы с помощью транспортирующего газа или другим способом.

Плазмохимический реактор должен обеспечивать устойчивое функционирование в условиях высоких температур и высокой химической активности среды. Размеры и геометрическая форма реактора должны обеспечивать необходимую производительность по расходу потока плазмы и химического сырья.

Реактор должен обеспечивать безопасность обслуживающего персонала при любых нештатных ситуациях. Несложно видеть, что оптимальный плазмохимический реактор промышленного должен удовлетворять достаточно большому комплексу НННх и внешних условий.

Схемы некоторых наиболее распространенных плазмохимических реакторов приведены на рис. 8.7. На рис. 8.7 (а, б) приведены схемы реакторов с поперечным и спутно-поперечным вдувом сырья в поток плазменной струи. Схемы реакторов встречным и встречно-поперечным вдувом сырья в поток плазмы показаны на рис. 8.7 (в, г).

Схема реактора, разработанная фирмой "Ионарк смел (США) для переработки цирконового песка с целью получения двуокиси циркония, приведена на рис. 8.7 (д). Основным источником энергии здесь является дуга переменного тока, горящая между двумя графитовыми электродами. Для обеспечения устойчивости горения дуги переменного тока в реактор вдувают

плазменную струю от ЭДП постоянного тока большой мощности. Сырье подают в объем плазмы спутно-поперечным вдувом.

Для плазмохимической переработки дисперсного сырья( песка, гранул) могут быть использованы реакторы, работающие режиме кипящего слоя (рис. 8.7 (з, и)). Для подачи в реактор сырья или удаления продуктов реакции в дисперсном состоянии обычно используют различные шнековые механизмы.

## **2.0 роли свободных электронов в кинетике химической активации реагентов в условиях низкотемпературной плазмы**

Физико-химические процессы, протекающие в РК плазмотрона и плазмохимическом реакторе, достаточно сложные и многообразные. В данном разделе рассмотрим наиболее важные из них, определяющие все последующие физико-химические превращения и имеющие место во всех типах плазмотронов. Как известно, в условиях электроразрядных генераторов низкотемпературной плазмы энергия электрического поля от источника передается свободным электронам, а затем, в столкновениях электронов с другими частицами, энергия перераспределяется по различным каналам. Роль свободных положительно заряженных ионов плазмы в джоулевой диссипации энергии электрического поля незначительна. В столкновениях с молекулами энергия быстрых электронов расходуется на ионизацию, диссоциацию и возбуждение молекул. Вероятность передачи энергии электронов молекуле по тому или иному каналу характеризуется

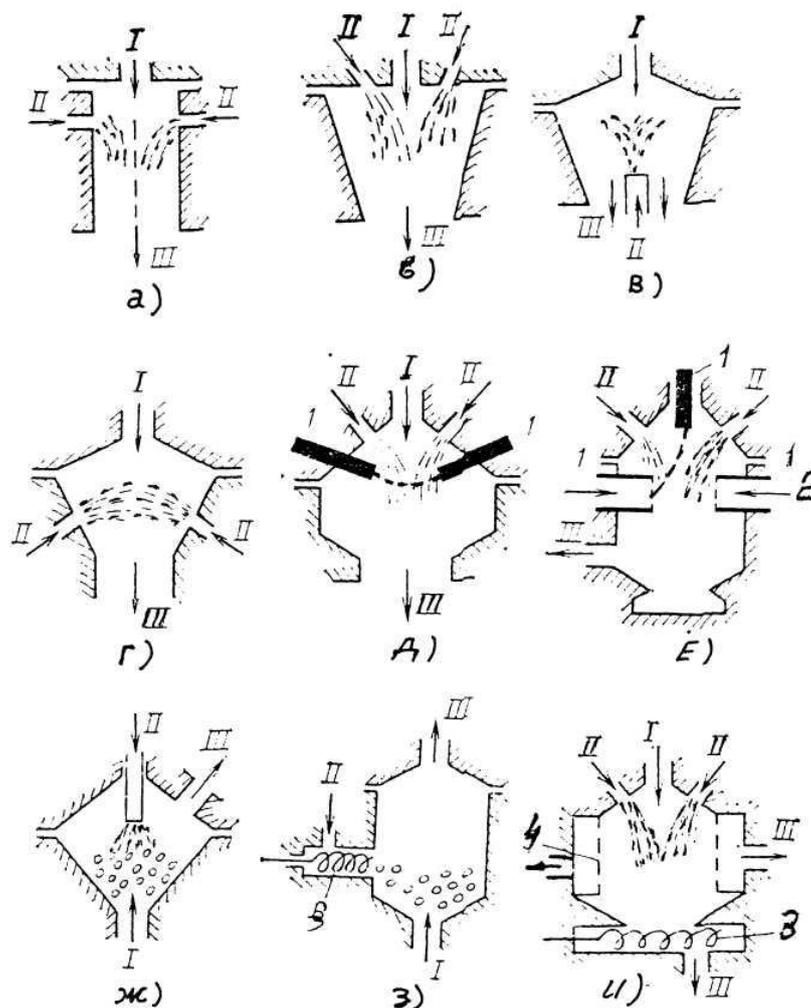


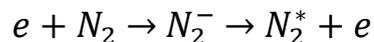
рис. 8.7. Схемы наиболее распространенных плазмохимических реакторов: I- поток плазмы II – поток сырья; III – выход газа; 1 – электроды; 2 – поток плазмообразующего газа; 3 – шнек; 4 – фильтр.

величиной соответствующего эффективного сечения, которая зависит от величины энергии электронов, строения и свойств молекул и других факторов.

В плазмотронах промышленного типа средняя тепловая энергия свободных электронов в плазме обычно ниже потенциала ионизации молекул, поэтому вероятность прямой ионизации молекул электронным ударом невелика. Следовательно, незначительна и роль процессов ионизации электронным ударом в химических превращениях. Главную роль в первичных актах химических превращений здесь играют процессы возбуждения молекул и диссоциации их на нейтральные компоненты.

Впервые значительная роль процессов термического возбуждения и диссоциации молекул электронным ударом была отмечена и подробно исследована Д.И. Словецким [130, 131]. В условиях низкотемпературной плазмы свободный электрон, сближаясь с нейтральной молекулой, искажает ее внутреннее поле. Это ведет к изменению условий взаимодействия атомов в молекуле и далее к ее возбуждению. Наряду с возбуждением электронных энергетических уровней молекул имеет место возбуждение колебательных и вращательных уровней. В работе [132] показано, что в условиях тлеющего разряда ( $T_e > T_i$ ) наиболее вероятным первичным процессом при столкновениях электрона с молекулой будет возбуждение колебательных уровней. Так, например, для молекулы азота сечение возбуждения колебательных уровней быстро растет с ростом энергии электронов и достигает максимальной величины  $\sim 10^{-16}$  см<sup>2</sup> при  $E_{эл} = 2$  эВ, а затем медленно убывает. Для молекулы СО максимум достигается при 1,7 эВ, а для молекулы N<sub>2</sub>O — при 0,7 эВ.

Одним из вероятных механизмов возбуждения колебаний молекул N<sub>2</sub> может быть ступенчатый механизм через промежуточное малоустойчивое состояние электроотрицательного иона из-за прилипания электрона по схеме



Время жизни молекул в возбужденных состояниях мало, поэтому следует быстрый переход в преддиссоциационное состояние и далее распад молекулы на нейтральные атомы. Многочисленные исследования показали, что такой процесс наиболее вероятный, чем излучательный переход в основное состояние. Процесс колебательного возбуждения через образование промежуточного нестабильного электроотрицательного иона, который распадается с образованием колебательно возбужденной молекулы, наиболее вероятный для молекул СО, NO, СО<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>[133].

В реальных условиях существования электродуговой плазмы наибольшее число свободных электронов обладает энергиями, лежащими в диапазоне от 0,5 до 5 эВ. Кроме описанных процессов, эти электроны с разными значениями энергии при столкновениях способны осуществить ступенчатое возбуждение молекул на самые различные уровни. В результате появляются частицы с большой степенью химической активности, которые нельзя получить при однократных электрон-молекулярных столкновениях [134].

Приведенные механизмы передачи энергии электромагнитного поля от источника к химически реагирующим компонентам плазмохимической

системы являются наиболее вероятными. Как видно, энергетическая накачка и активация химических реагентов в условиях низкотемпературной плазмы происходит преимущественно за счет электрон-молекулярных столкновений через стадию колебательного возбуждения молекул. Столкновения химических реагентов с положительно заряженными ионами плазмы играют значительно меньшую роль в процессах энергообмена.

Таким образом, плазмохимические реакции являются цепными или многоканальными. После образования активных центров дальнейшие механизмы протекания плазмохимических реакций изучены мало. В теоретических исследованиях авторы используют те или иные модельные схемы, справедливость которых можно оценить только по результатам экспериментов.

### **О плазмохимических технологических процессах и некоторые их особенности**

Существующие плазмохимические технологические процессы разделяют на *термически равновесные* и *неравновесные*. К равновесным относятся термические процессы, протекающие при высоких температурах и атмосферных или выше давлениях. При этом считается, что в объеме реактора имеет место равенство температур всех частиц в химически реагирующей системе. Для термических процессов используется электродуговая плазма.

Неравновесные плазмохимические процессы протекают в условиях тлеющего, ВЧ или СВЧ разрядов со всеми вытекающими из этого особенностями. Как было отмечено, разрядная камера плазмотрона здесь выполняет одновременно и роль реактора.

Примерами термических плазменных процессов являются процессы получения неорганических материалов и процессы в металлургии, а также многочисленные процессы температурного крекинга. Термическая плазменная технология получения моторного топлива и различных технических масел позволяет осуществлять более глубокую переработку нефти и ее тяжелых фракций по сравнению с традиционными технологиями. С целью создания безотходных технологий на предприятиях органического синтеза представляют интерес плазменные технологии глубокой переработки тяжелых пиролизных смол для получения товарных продуктов или их утилизации. Тяжелые пиролизные смолы являются

отходами в производстве этилена в процессе пиролиза пропан-бутановых и этановых фракций. В настоящее время только на одном заводе этилена в Казани ежегодно сжигается до 5000 т этих отходов. При этом теряется углеводородное сырье и обостряется экологическая обстановка.

Актуальными являются разработки плазменных технологий переработки нефтебитуминозных пород (НБП) с получением товарных продуктов из органической и минеральных частей. По оценкам сотрудников ВНИИ углеводородного сырья (Казань), запасы нефтебитуминозных пород только в Татарстане более 10 млрд т. Эти породы содержат большое количество редкоземельных металлов, ванадий, никель, а также нефтяные кислоты и смолы, низкозастывающие моторные топлива, дорожные, строительные и спецбитумы [141]. Над проблемой повышения эффективности плазменных технологий переработки НБП с получением металлов и углеводородных товарных продуктов успешно работают также на фирмах США, Канады и Японии.

Высокоэффективные процессы плазмохимического пиролиза углеводородсодержащих сред, таких как уголь, нефть, природный газ, НБП и др., следует рассматривать как основу химических технологий XXI века [142 и др.].

Термические плазменные процессы являются эффективными в технологиях утилизации и обезвреживания опасных отходов, включающих химические, медицинские, бытовые и промышленные. Особо следует отметить плазменные технологии по обезвреживанию химических и бактериологических боеприпасов. Современное состояние разработок электродуговых печей и плазмотронов мощностью от 1 до 10 МВт для переработки токсичных отходов производств, дожигания газовых выбросов, переработки металлургической пыли и т.д. показано в работе [135], там же приведен обзор наиболее известных технологических процессов. В [136] рассмотрены технические и экономические вопросы, связанные с применениями плазменных технологий в производстве для получения новых материалов и химических соединений, обработки и очистки поверхностей, получения полупроводников и антикоррозионных покрытий. Подробный обзор фундаментальных исследований по плазмохимическим технологиям с применением ЭДП приведен в работе [137].

Классическим примером плазмохимической технологии, успешно конкурирующей с традиционной химической технологией, является

плазменная технология получения ацетилена ( $C_2H_2$ ) из природного газа и угля. Так, например, на электродуговой установке фирмы "AVCO" мощностью 1 МВт производительность производства ацетилена из угля достигла 4900 т в год. По данным экономистов, себестоимость плазменной технологии получения 1 кг ацетилена невысока и лежит в пределах 24—26 центов, в зависимости от стоимости электроэнергии в данном регионе США [138].

Ацетилен является ценным химическим продуктом. Из него получают винилхлорид, синтетические волокна, каучуки с заданными свойствами. На основе ацетилена созданы новые технологии получения присадок к маслам, моторным топливам, новые стабилизаторы полимеров и т.д. [138]. Химический синтез на основе ацетилена обычно не требует дополнительных затрат энергии и характеризуется высокой степенью конверсии сырья в товарный продукт.

Одним из путей реализации процесса плазмохимического пиролиза природного газа с получением ацетилена является нагрев сырья в потоке термической плазмы водорода. Водород здесь выступает как теплоноситель и химический реагент. Опыты показали, что более вероятным механизмом пиролиза метана является механизм Касселя [139]. Согласно схеме Касселя, преобразование метана протекает по следующему пути:



При высоких температурах ( $T > 1500$  К) реакции образования  $C_2H_2$  протекают на порядок быстрее, чем реакции его разложения, поэтому с повышением температуры выход ацетилена растет. Следовательно, для высокого производительного и эффективного процесса необходимо использовать более мощные плазменные установки. Например, на заводах фирмы "ХЮЛС" (ФРГ) применяют плазмохимические установки мощностью до 8,2 МВт, ток ЭДП= 1150 А, С=7 кВ, длина дуги 1 м, максимальная температура на оси дуги 18300 К, а средне-массовая температура в реакторе 1870 К [140].

В работе [143] показан один из путей повышения эффективности процесса пиролиза метана. Известно, что для получения ацетилена оптимальная температура в реакторе должна быть 1800—2100 К. Если

температура в реакторе 1200—1300 К, то продуктом пиролиза будет в основном этилен. Таким образом, вдувая в закалочное устройство в качестве хладоагента этан-пропан-бутановую смесь, можно, за счет энергии охлаждения ацетилена, дополнительно получать этилен ( $C_2H_4$ ), который также является ценным сырьем для химического синтеза.

Перспективность и эффективность применения плазмохимической технологии в процессах переработки сероводорода были впервые показаны в работах [144—146]. Сероводород относится к ядовитым газам, он в больших количествах вырабатывается на нефтеперерабатывающих заводах, выделяется на нефтяных и газовых промыслах. Однако сероводород является и ценным химическим сырьем для производства товарной серы и молекулярного водорода — экологически чистого энергоносителя. Первая установка по плазмохимической переработке сероводорода на водород и серу на основе СВЧ плазмотрона мощностью 50 кВ была построена на Дрог обычном нефтеперерабатывающем заводе в 1986 г. Последующие исследования показали, что если проводить процесс в условиях неравновесной плазмы СВЧ разряда, минимальные затраты на получение молекулы водорода не превышают 0,7 эВ, а степень диссоциации  $H_2S$  может быть близка к 100% [147].

Процесс разложения сероводорода в потоке термической плазмы водорода был запатентован в ФРГ [146]. Исследования [149 и др.] показали, что можно добиться достаточно высокой эффективности процессов переработки  $H_2S$  также и в условиях электродуговой плазмы.

Одними из актуальных в экологии являются задачи утилизации отходов хлорорганических производств, включая пришедшие в негодность пестициды. Хлорорганические отходы обладают плохой биоразлагаемостью, а под действием солнечных лучей на воздухе они окисляются с образованием отравляющих веществ — диоксинов, фозгена и фурана. Например, в [150] отмечается, что основным источником поступления в атмосферу этих высокотоксичных соединений являются печи по сжиганию отходов, содержащих ароматическую хлорорганику. Решить эту проблему могут плазменные технологии по переработке и утилизации хлорорганических отходов. После обработки в потоке термической плазмы, при соблюдении технологического режима, разрушаются практически все многоатомные, циклические соединения, и отравляющие вещества более не синтезируются. Следует отметить, что плазменные установки достаточно полно удовлетворяют требованиям экологии, они мобильные и экономически более выгодные, по сравнению с газовыми печами по сжиганию хлорорганических отходов [150, 151].

Для реализации термических плазменных процессов используются плазмохимические установки с самыми различными параметрами. Например, используются плазмотроны мощностью от 10 кВт до 10 МВт, температура плазмы в области реактора может меняться от 1200 до 45 тыс. К. Средние скорости потоков 100—1000 м/с. На практике применяются реакторы длиной от 1 см до 10 м, а закалочные устройства бывают от 1 мм до 30 см. Необходимые скорости закалки достигают значений  $10^5$ — $10^7$  К/с, при разности температур до 3 тыс. К.

В настоящее время, плазмохимическая технология является практически единственной промышленной технологией синтеза озона ( $O_3$ ). Озон — один из перспективных окислителей и реагентов в химии органического синтеза. Общеизвестны примеры использования озона для обеззараживания питьевой воды и бытовых сточных вод. В озоновоздушной атмосфере эффективно подавляется развитие патогенной микрофлоры — вирусов, бактерий, грибов. Озоно-каталитические технологии переработки отходов из полимеров (полиэтилен, поливинилхлорид, полистирол и др.) позволяют получать из отходов вторичные материалы и товарные продукты, а также решить вопросы утилизации изделий из полимеров [104]. Следует отметить также применение озона в технологии очистки сточных вод, содержащих токсичные соединения [102, 103].

Современные генераторы озона — озонаторы — сконструированы на основе плазмотронов барьерного разряда (БР) [102]. Синтез озона осуществляется в объеме разрядной камеры при продувании воздуха или кислорода в условиях термически неравновесной плазмы. Альтернативные типы плазмотронов — тлеющего и ВЧ разрядов — работают при пониженных давлениях, поэтому не применяются для промышленной генерации озона. Промышленные озонаторы выпускаются в России и за рубежом. Наиболее экономичными и производительными являются озонаторы типа Шаузи -7500 фирмы "Трейлигаз" (Франция), производительность по озону 8,3 кг/час, а энергозатраты на синтез озона составляют 14 кВт час/кг.

Примеров плазмохимических технологических процессов можно привести множество. Это пиролиз жидких углеводородов, газификация угля, сланцев и торфа, разложение  $CO$ , окислов азота и других газовых выбросов. О применениях плазменных технологий в электронной технике, в производстве тонких пленок для микроэлектроники, в процессах

получения материалов для специальной техники и т.д. подробно можно познакомиться в [ПО, 154].

Несмотря на многообразие плазмохимических процессов и технологий, в основе их лежат общие закономерности. В условиях низкотемпературной плазмы на химическую систему в комплексе воздействуют быстрые электроны и ионы, а также разные по физической природе потоки энергии. Все это приводит к образованию высокоактивных центров, ведущих к химическим превращениям с очень высокими скоростями. Теоретическая плазмохимия является пока молодой, но быстро прогрессирующей наукой. В настоящее время оптимальные термодинамические и газодинамические условия для протекания заданной плазмохимической реакции определяют в основном из эксперимента. Эффективность и производительность плазмохимического процесса в целом определяются оптимальными условиями тепло- и массообмена и особенностями газодинамики в объеме реактора, а также правильно организованной закалкой целевых продуктов. Информацию о плазменных технологиях, их особенностях и областях применения можно получить также в специальных изданиях и научно-технических публикациях.