

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Российский химико-технологический университет
имени Д. И. Менделеева

МЕШАЛКИН В.П.

**ВВЕДЕНИЕ В ИНЖИНИРИНГ
ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ
ХИМИКО–ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Утверждено
Редакционным советом университета
в качестве учебного пособия

Москва
2020

УДК ?????????

ББК ???????

М??

Рецензенты:

академик РАН

Л.И. Леонтьев

профессор, доктор технических наук,

РХТУ имени Д.И. Менделеева

Т.А. Ваграмян

Мешалкин В.П.

М??

Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико–технологических систем : учебное пособие / В.П. Мешалкин – М.:РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2020 – 212 с.

ISBN 978–5–

Изложены основные понятия инжиниринга химико–технологических систем (ХТС), показано значение теории инжиниринга энергоресурсоэффективных ХТС, цифровизации и интенсификации ХТС, а также логистики энергоресурсосбережения для реализации целей устойчивого развития.

Учебное пособие предназначено для бакалавриантов и магистрантов, обучающихся по направлению 18.03.02 «Энерго– и ресурсосберегающие процессы в химической технологии нефтехимии и биотехнологии» и по направлению 27.04.06 «Организация и управление наукоёмкими производствами».

УДК ?????????

ББК ???????

ISBN 978–5–

© Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2020

© Мешалкин В.П., 2020

Содержание

| | |
|--|-----|
| Предисловие..... | 5 |
| Введение..... | 9 |
| Список основных русских сокращений..... | 14 |
| Список основных английских сокращений..... | 15 |
| Глава 1. Инжиниринг химико–технологических систем как область проектно–технологической и организационно–технической деятельности..... | 16 |
| 1.1. Основные понятия и классификация видов инжиниринга..... | 16 |
| 1.2. Инжиниринг на различных этапах жизненного цикла химико–технологических систем..... | 21 |
| 1.3. Краткая характеристика инструментов компьютеризированного инжиниринга технических систем и бизнес–процессов..... | 24 |
| 1.4. Понятия анализа, оптимизации и синтеза химико–технологических систем..... | 31 |
| Глава 2. Основные направления обеспечения энергоресурсосбережения в химико–технологических системах..... | 34 |
| 2.1. Энергоресурсосбережение как важнейший научно–технологический и организационно–экономический фактор перехода к устойчивому развитию..... | 34 |
| 2.2. Краткая характеристика химико–технологических систем как объектов инжиниринга..... | 45 |
| 2.3. Понятия малоотходных и энергоресурсосберегающих химико–технологических систем..... | 61 |
| 2.4. Краткая характеристика способов и приемов энергоресурсосбережения в химико–технологических системах..... | 67 |
| 2.5. Основные концепции логистики ресурсоэнергосбережения..... | 75 |
| 2.6. Организационно–функциональная структура цепей поставок химической продукции..... | 83 |
| 2.7. Расширенный термодинамический пинч–метод инжиниринга энергосберегающих производственных комплексов..... | 88 |
| 2.8. Краткая характеристика принципов автоматизированного синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных химико–технологических систем..... | 98 |
| Глава 3. Инжиниринг энергоресурсосберегающих технологий обезвреживания и обработки отходов..... | 105 |
| 3.1. Стратегия минимизации отходов в химико–технологических системах..... | 105 |
| 3.2. Общая характеристика современных технологических способов обработки отходов и очистки выбросов в химико–технологических системах..... | 128 |

| | |
|---|-----|
| 3.3. Классификация технологических процессов и аппаратов очистки водных стоков | 133 |
| 3.4. Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии очистки стоков гальванических производств..... | 138 |
| Глава 4. Цифровизация и интенсификация энергоресурсосберегающих химико–технологических систем..... | 143 |
| 4.1. Сущность концепции промышленной революции «Индустрия 4.0»..... | 143 |
| 4.2. Методика инжиниринга цифрового химического предприятия..... | 147 |
| 4.3. Роль корпоративных информационных систем в обеспечении энергоресурсоэффективности цифровизированных химических предприятий..... | 151 |
| 4.4. Основные понятия интенсификации химико–технологических процессов и химико–технологических систем..... | 154 |
| 4.5. Методология системного подхода к решению неформализованных задач интенсификации химико–технологических процессов..... | 158 |
| Глава 5. Принципы, основные направления и способы интенсификации энергоресурсосберегающих химико–технологических процессов..... | 167 |
| 5.1. Краткая характеристика принципов микроуровневой интенсификации энергоресурсосберегающих химико–технологических процессов..... | 167 |
| 5.2. Основные факторы и способы интенсификации химических процессов..... | 172 |
| 5.3. Способы интенсификации теплообменных процессов..... | 176 |
| 5.4. Способы интенсификации процессов ректификации..... | 180 |
| 5.5. Комбинированные химико–технологические процессы..... | 185 |
| 5.6. Способы наилучшего функционально–структурного использования оборудования в химико–технологических системах..... | 188 |
| Заключение. Профессиональная карьера выпускников кафедры Логистики и Экономической Информатики (ЛогЭКИ) РХТУ им. Д.И. Менделеева..... | 191 |
| Глоссарий основных терминов и понятий..... | 196 |
| Литература..... | 205 |
| Краткие сведения об авторе..... | 208 |

Предисловие

Важным фактором успешного выполнения экономических, социальных и экологических целей устойчивого развития человечества, провозглашенных в 2000 году Генеральной Ассамблеей Организации Объединенных Наций, являются научно–обоснованный инжиниринг, промышленная реализация и цифровизированное управление эксплуатацией энергоресурсоэффективных экологически безопасных производств и предприятий химического, нефтегазохимического (НГХК) и металлургического комплекса.

Высоко интенсивные химико–технологические процессы (ХТП) и энергоресурсоэффективные экологически безопасные химико–технологические системы (ХТС), представляющие собой промышленные производства НГХК, обеспечивают в соответствии с целями устойчивого развития рациональное использование природных ресурсов, охрану окружающей среды от загрязнений, сохранение биологического разнообразия природных систем, социально–культурную гармонизацию общества, повышение экономической эффективности промышленных предприятий и цепей поставок (ЦП), улучшение качества и увеличение продолжительности жизни людей.

Научно–обоснованное решение указанных выше научно–технологических и организационно–экономических задач, реализующих цели устойчивого развития, могут осуществлять бакалавры технологи, которые имеют знания, навыки и умения в области:

- интенсификации ХТП и обеспечения энергоресурсоэффективности ХТС;
- инжиниринга оптимальных технологических схем ХТС и автоматизированных систем управления эксплуатацией энергоресурсосберегающих производств и ЦП;
- управления инновационными бизнес–проектами по инжинирингу энергоресурсосберегающих экологически безопасных цифровизированных производств и цепей поставок НГХК;

- анализа и управления производственными, финансовыми и экологическими решениями промышленных предприятий и цепей поставок, методы интенсификации химико–технологических процессов;
- составления планов стратегического, тактического и оперативного управления энергоресурсосбережением на промышленных предприятиях и в цепях поставок НГХК;
- планирования цифровизации производства НГХК;
- организации и проведения энергетического аудита на промышленных, коммерческих и коммунально–бытовых предприятиях;
- оптимизации энергоресурсоэффективности производств, предприятий и цепей поставок НГХК и производств малотоннажной химии;
- выбора и практического использования корпоративных информационных систем логистического ХТП, бизнес–процессами и материальными ресурсами предприятий;
- инжиниринга логистических систем управления «зелёными» цепями поставок продукции НГХК.

В результате глубокого изучения и прочного усвоения материала предлагаемого учебного пособия **«Введение в инжиниринг энергоресурсосберегающих химико–технологических систем»** будущие бакалавры технологии приобретут ряд компетентностей, т.е. совокупность знаний, навыков и умений, представляющих собой прочную базу уникальной **«широкой тройной квалификации в области химической технологии, логистики и организации производств НГХК»**, что обеспечит им успешный поиск интересной высокооплачиваемой работы в различных отраслях и сферах деятельности экономики России и индустриально развитых государств:

- **в области инжиниринга, организационно–технической и инновационной деятельности:**
 - на производственных предприятиях,
 - в инжиниринговых центрах и консультативных центрах,

- в проектных организациях и научно–исследовательских институтах,
- в вертикально–интегрированных компаниях нефтегазохимического, топливно–энергетического и химического комплекса;
- **в области логистики и управления цепями поставок**, организационно–экономической и административно–управленческой деятельности в сфере:
 - производства;
 - материально–технического обеспечения;
 - цифрового предпринимательства;
 - складирования;
 - транспорта;
 - цифровой коммерции;
 - оказания услуг;
 - государственного и муниципального управления.

Приобретенная бакалаврами указанная уникальная широкая квалификация на многие годы обеспечит высокий потенциал устойчивого развития их деловой карьеры как в различных отраслях промышленности и предпринимательства, так и в сфере услуг.

Учебное пособие предназначено для изучения бакалавриантами и магистрантами следующих специальных профильных дисциплин: **«Теоретические основы энергоресурсосберегающих химико–технологических систем»**, **«Способы интенсификации химико–технологических процессов»** и **«Методы цифровизации производств нефтегазохимического комплекса»**, которые преподаются по направлениям **18.03.02 «Энерго– и ресурсосберегающие процессы в химической технологии нефтехимии и биотехнологии»** и **27.04.06 «Организация и управление наукоемкими производствами»**.

Автор выражают особую благодарность за большую организационно–техническую работу по подготовке к печати указанного учебного пособия магистрантке Я.П. Барановой.

Автор благодарит за организационно–техническую помощь при подготовке к печати указанного учебного пособия доцента В.В. Васильева и аспирантку Е.В. Заболотную.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность рецензентам – академику РАН Л.И. Леонтьеву и профессору, д.т.н. Т.А. Ваграмяну за ценные советы и пожелания при обсуждении содержания учебного пособия.

Введение

Предприятия НГХК потребляют для производства товарных продуктов огромные количества разнообразных видов природного сырья и топливно–энергетических ресурсов. При эксплуатации производства НГХК, представляющие собой различного уровня сложности ХТС, оказывают вредное воздействие на окружающую природную среду (ОПС) за счет образования большого количества отходов (газообразных, жидких, твердых и тепловых). Важнейшим показателем экономической эффективности и снижения уровня вредного воздействия на ОПС предприятий НГХК является **энергоресурсосбережение**.

Энергоресурсосбережение — это совокупность разнообразной научно–исследовательской, образовательной, проектно–конструкторской, производственно–хозяйственной, организационно–экономической, управленческой и любой предпринимательской деятельности, выполняемой на основе наиболее полного использования интеллектуальных и информационных ресурсов общества, по обеспечению оптимальных удельных расходов всех видов природных и материальных ресурсов (минеральное и углеводородное сырье, топливно–энергетические ресурсы, вода, воздух), а также трудовых ресурсов, которые необходимы для выпуска в требуемом месте и в требуемое время требуемого вида требуемого качества и требуемого количества продукции с соблюдением условий национального и международного законодательства, а также условий охраны ОПС от загрязнений.

Развитие реального сектора экономики, к которому относятся производства и ЦП продукции НГХК, может осуществляться экстенсивно или интенсивно. Слово «**экстенсивность**» (от лат. “**extensivus**”) – количественное увеличение, распространение, расширение; «**экстенсивный**» – увеличенный, расширенный. Слово «**интенсивность**» (от лат. “**intensio**”) – напряжение, усиление; «**интенсивный**» – усиленный, напряженный, действенный, сосредоточенный.

Экстенсивное развитие химического комплекса и НГХК основано на значительном росте количества используемых в производстве всех видов ресурсов. **Интенсивное развитие** базируется на повышении эффективности использования и переработки всех видов ресурсов.

Интенсификация ХТП и ХТС обеспечивает увеличение их экономической эффективности в результате целенаправленного влияния специальных физико–химических, термодинамических и организационно–управленческих факторов на производительность оборудования; на сокращение расходов сырья, материалов и энергии; на повышение качества выпускаемой продукции; на снижение затрат труда и повышение уровня цифровизации и автоматического управления. Важнейшим фактором интенсификации производства и экономического роста является научно–технический прогресс, который предполагает в настоящее время широкое использование всех достижений промышленной революции «Индустрия 4.0», включая применение методов теории искусственного интеллекта для цифровизации химических производств и инжиниринга наукоемких энергоресурсоэффективных экологически безопасных ХТП и ХТС.

При оценке результатов функционирования действующих производств химического комплекса и НГХК а также при оценке результатов инжиниринга и показателей эксплуатации сложных энергоресурсоэнергосберегающих ХТС и химико–энерго–технологических (ХЭТС), а также уровня интенсификации ХТП в отраслях НГХК необходимо использовать характеристики **результативности и эффективности**.

Результативность (эффект) — характеризует совокупность требуемых конечных результатов (эффектов, итогов) явления, процесса или вида деятельности, функционирования ХТС или ХЭТС предприятия НГХК или экономики в целом.

Эффективность — это обобщающая характеристика качества экономического роста. **Экономический рост** — это рост реального выпуска экономики во времени, который обычно измеряется показателем увеличения либо реального **Валового Национального Продукта (ВНП)** или реально-

го **Валового Внутреннего Продукта (ВВП)**, либо дохода на душу населения. Количественные показатели эффективности определяются соотношением между показателями результативности (эффектом) и финансовыми затратами или потребляемыми ресурсами.

Повышение эффективности производства выражается в увеличении конечных результатов при абсолютном или относительном (в расчете на единицу результатов) сокращении затрат. Во многих случаях при расчете показателей эффективности результаты сопоставляются с используемыми ресурсами — объемом потребляемых материальных ресурсов и основных фондов, численностью работников, площадью используемой промышленной территории и др.

Принято различать **технологическую, экономическую и социальную эффективность** производства, которые полностью соответствуют трем основным группам **прогрессивных индексов (или индикаторов) устойчивого развития** (организационно–экономические, социальные и экологические индикаторы). При определении величины технологической и экономической эффективности в качестве количественного результата (итога деятельности) используют величину выпуска (объема продукции) или объема национального дохода, полученного в производстве, прибыль или технико–экономические показатели продукции.

Технологическая эффективность производства — это характеристика производства, которая в натуральном выражении определяет оптимальное сочетание факторов производства продукции при некотором заданном уровне выпуска.

Экономическая эффективность производства — это одна из характеристик производства, определяющая при данном объеме выпуска продукции такое оптимальное сочетание факторов производства, которое минимизирует затраты.

Социальная эффективность производства — это показатель улучшения условий труда, сокращения рабочего времени и сохранения среды обитания человека.

Управление обращением с отходами — это комплексная совокупность физико–химических методов и организационно–управленческих мероприятий, обеспечивающих предотвращение образования отходов в ХТП и аппаратах; организационно–управленческих мероприятий по сбору и переработке образующихся отходов, осуществление которых позволит минимизировать отходы на производствах и предприятиях НГХК, что повышает показатели энергоресурсоэффективности и экоэффективности производств и предприятий, снижает их вредное воздействие на ОПС и увеличивает экономическую эффективность и конкурентоспособность предприятий.

Важнейшим организационно–управленческим фактором повышения энергоресурсоэффективности и минимизации отходов промышленных предприятий является использование **стратегий логистики и передовых методов управления цепями поставок предприятий НГХК.**

Научно–методологической основой поиска экономически эффективных решений задач минимизации отходов, оптимизации показателей энергоресурсоэффективности и экологической безопасности НГХК являются способы инжиниринга энергоресурсосберегающих ХТС, способы интенсификации ХТП, принципы «зеленой» химии, теория анализа и синтеза энергоресурсоэффективных высоконадежных ХТС, методы математического моделирования и оптимизации ХТС, методы логистики энергоресурсосбережения и стратегии управления цепями поставок высококачественной продукции НГХК, методы цифровизации производств, предприятий и ЦП.

Важнейшими организационно–управленческими, методическими и нормативными инструментами практической реализации способов энергосбережения НГХК и технологии минимизации отходов являются следующие **основополагающие документы: российские Информационно–Технические Справочники по Наилучшим Доступным Технологиям (НТС–НДТ) и разработанный в Европейском Союзе «Справочный документ по наилучшим доступным методам переработки нефти и газа» («Reference Document on Best Available Techniques for Mineral Oil and Gas**

Refineries» — общепринятое английское сокращение документа — «**BREF–BAT**»), Законодательство Европейского Союза «**REACH**» («**Registration, Evaluation, Authorization of Chemicals**» — «Регистрация, оценивание и разрешение химикатов») и общественная программа «**Responsible Care**» («**Ответственная забота**»), предусматривающая добровольное использование предприятиями НГХК основных передовых мероприятий по повышению энергоресурсоэффективности, экологической безопасности и охраны труда на предприятиях НГХК.

Список основных русских сокращений

- БД** – база данных
- БП** – бизнес–процесс
- ВВП** – валовый внутренний продукт
- ВНП** – валовый национальный продукт
- ЖЦ** – жизненный цикл
- КЭ** – критерий эффективности
- ММ** – математическая модель
- НГХК** – нефтегазохимический комплекс
- НДТ** – наилучшие доступные технологии
- ОПС** – окружающая природная среда
- ОС** – окружающая среда
- ПО** – программное обеспечение
- ТЭР** – топливно–энергетические ресурсы
- ХТП** – химико–технологический процесс
- ХТС** – химико–технологическая система
- ХЭТС** – химико–энерго–технологическая система
- ЦП** – цепь поставок
- ЦРТ** – цели развития тысячелетия
- ЦУР** – цели устойчивого развития
- ЧПУ** – числовое программное управление

СПИСОК ОСНОВНЫХ АНГЛИЙСКИХ СОКРАЩЕНИЙ

BAT–BREF – Best Available Techniques REferences

BRP – Business process reengineering

CAD – Computer Aided Design

CALS – Computer Aided Logistics Support

CAM – Computer Aided Manufacturing

CRM – Customer Relation Management

ERP – Enterprise Resource Planning

KPI – Key Performance Indicators

PDM – Product Data Management

PLM – Product Life–cycle Management

SCM – Supply Chain Management

SWOT – Strengths Weaknesses Opportunities Threats

Глава 1. Инжиниринг химико–технологических систем как область проектно–технологической и организационно–технической деятельности

1.1. Основные понятия и классификация видов инжиниринга

Для обеспечения высоких показателей энергоресурсосбережения, надёжности и экологической безопасности различных химико–технологических систем (ХТС) производства конкурентоспособных высококачественных материалов и химических веществ в соответствии с требованиями, спецификациями, руководящими принципами и характеристиками производственных систем, технических устройств, бизнес–процессов, продукции и услуг, устанавливаемыми Национальными стандартами России и Международной организации по стандартизации, ИСО (International Organization for Standardization, ISO) в области ресурсосбережения, энергосбережения и экологического менеджмента, а также характеристиками нормативно–правовых актов по наилучшим доступным технологиям (В Европейском Союзе – Best Available Techniques REferences – «BAT–BREF» в Российской Федерации Информационно–технические справочники по Наилучшим доступным технологиям «ИТС–НДТ») различным специалистам необходимо выполнять при проектировании, строительстве и эксплуатации энергоресурсосберегающих ХТС разнообразные виды инжиниринга.

Инжиниринг – это комплексная техническая, расчетно–графическая, организационно–техническая, технико–экономическая и консультативно–техническая деятельность, которая реализует выполнение разнообразной научно–исследовательской, проектно–конструкторской, расчетно–аналитической, организационно–управленческой и технико–экономической работы на всех этапах жизненного цикла:

- предпроектные исследования, технико–экономическое обоснование;
- бизнес–планирование;

- управление проектированием;
- разработка проектов;
- строительство и пуск в эксплуатацию;
- управление эксплуатацией и техническим обслуживанием

любых производственных систем, в том числе ХТС, технических и социально–экономических систем. Сложным ХТС соответствуют производства, входящие в структуру предприятий и цепей поставок (ЦП) нефтегазохимического комплекса (НГХК), теплоэнергетического и металлургического комплекса. Русское слово «**инжиниринг**» происходит от английского слова «**engineering**» – «**разработка**», «**техника**», «**инженерия**» (от латинского «**ingenium**» – «**изобретательность**», «**выдумка**», «**знания**»).

Для получения научно–обоснованных результатов инжиниринга оптимальных энергоресурсосберегающих высоконадежных ХТС и цепей поставок (ЦП) НГХК необходимо широко использовать методы и алгоритмы теории анализа, оптимизации и синтеза ХТС; методы логистики ресурсосбережения и оптимального организационно–функционального проектирования энергоресурсоэффективных ЦП.

Учитывая современное определение **логистики** как вида организационно–технической и управленческой деятельности (в широком понимании), – это «**подробное оптимальное планирование любой сложной операции**» (см. A Dictionary of Business and Management, 4–th Edition, Oxford University Press, 339 p.), **инжиниринг** безусловно относится к выполнению разнообразной логистической деятельности и логистического управления ЦП не только материальных потоков разнообразной промышленной продукции, товаров и услуг, но и интеллектуальных потоков различных знаний, навыков и умений, т.е. **компетентностей**, представляющих собой важнейшую интеллектуальную продукцию современной цифровой или **электронной экономики** (digital or electronic economy) и **экономики знаний** (knowledge economy).

Кроме того, указанная тесная лингвистическо–семантическая взаимосвязь понятия «**инжиниринг**» с понятием «**логистика**» также логически

подтверждается толкованием понятия слова «**logistike**», которое в переводе с древнеримского и древнегреческого языков означает «**искусство вычислять**», «**искусство принимать решения**», «**правильное рассуждение**», «**способность к рассуждению**».

В настоящее время выделяют следующие **основные виды инжиниринга**:

- функционально–производственный,
- комплексный технический,
- строительный,
- эксплуатационный,
- международный,
- компьютеризированный.

Выделяют следующие основные виды функционально–производственного инжиниринга по отраслям и сферам деятельности экономики, а также по отраслям техники:

- **системотехника** (*System Engineering*)¹;
- **химическая техника** (химический инжиниринг, химическая инженерия), или в русскоязычной научно–технической литературе – «**процессы и аппараты химической технологии**» (*Chemical Engineering*);
- **инжиниринг** (инженерия, техника) **химико–технологических систем** (*Chemical Process Engineering*), или в русскоязычной научно–технической литературе – «**разработка химико–технологических систем**»;
- **энергетическая техника** (*Power Engineering*);
- **теплотехника** (*Heat Engineering*);
- **машиностроение** (*Mechanical Engineering*);
- **логистическая техника**, или «**инженерная логистика**» (*Logistics Engineering*);

1. Впервые в России термин введён в 1961 году профессором кафедры Автоматики и телемеханики МЭИ, д.т.н. Ф.Е. Темниковым.

- **инжиниринг (инженерия) знаний (*Knowledge Engineering*)**.

Комплексный технический инжиниринг (*Comprehensive Technical Engineering*) – это полный комплекс работ и услуг по обоснованию, разработке и реализации проекта технической системы или производственного объекта, включая создание объектов **интеллектуальной собственности (*intellectual property*)** («ноу-хау», патенты, изобретения, товарные знаки, свидетельства о государственной регистрации программ и др.), поставку оборудования и сдачу технической системы «под ключ».

В общем интеллектуальная собственность – законодательно закрепленное временное исключительное монопольное право, а также личные неимущественные права автора на результат его личной интеллектуальной деятельности или средства индивидуализации.

Строительный инжиниринг (*Building Engineering*) – это комплекс работ и услуг по строительству технической системы или промышленного объекта.

Эксплуатационный инжиниринг (*Operational Engineering*) – это инженерно-технические работы и услуги по совершенствованию реализации производственно-технологических процессов и бизнес-процессов в действующей технической системе или на промышленном объекте.

Международный инжиниринг (*International Engineering*) – выполнение инженерно-технических работ и оказание услуг на мировом рынке. В этом случае контракт на выполнение инжиниринга или оказание инжиниринговых услуг является разновидностью международного контракта.

Компьютеризированный (автоматизированный) или цифровизированный инжиниринг (*Computer-Aided or Digital Engineering*) – мультидисциплинарные, многомасштабные (многоуровневые) и многоэтапные разработки и исследования проектов с широким применением ЭВМ, обеспечивающие автоматизированное выполнение всех видов инженерно-технических разработок по созданию технических систем и промышленных объектов на основе широкого использования средств и оборудования вычислительной техники, а также наукоемких информационно-коммуникаци-

онных технологий (ИКТ), включая инструментальные комплексы технических и программных средств автоматизированного проектирования изделий (***Computer–Aided Design – CAD–технологий***); инструментальные комплексы компьютеризированной интегрированной логистической поддержки (***Computer–Aided Logistics Support – CALS–технологий***), по мере совершенствования которых существенно расширился спектр охватываемых ими функций.

В настоящее время оставшаяся неизменной аббревиатура ***CALS*** получила новую расшифровку – ***Continuous Acquisition (Information) and Life–cycle Support*** – непрерывная интегрированная информационная поддержка всего **жизненного цикла** (ЖЦ) изделия, или непрерывное накопление информации и поддержка ЖЦ.

Для оптимального управления эксплуатацией энергоресурсоэффективных промышленных производств и ЦП предприятий НГХК осуществляется инжиниринг систем компьютеризированного логистического управления ресурсами предприятий (***Enterprise Resource Planning – ERP–систем***), систем управления ЦП (***Supply Chain Management – SCM–систем***), систем управления отношениями с потребителями (***Customer Relation Management – CRM–систем***), а также систем компьютеризированного управления ЖЦ продукции (***Product Life–cycle Management – PLM–систем***) и систем управления данными о продукции (***Product Data Management – PDM–систем***).

Все виды инжиниринга как специального вида деятельности или специальной услуги выполняются ***специализированными инжиниринговыми компаниями***, а также ***строительными и промышленными компаниями***. Если эксплуатация технической системы или производственного объекта требует большого разнообразия работ и видов услуг, входящих в комплекс инжиниринговых услуг по созданию технической системы, то привлекаются фирмы, специализирующиеся на выполнении определенных видов специальных услуг, включая логистические услуги и услуги по управлению ЦП.

1.2. Инжиниринг на различных этапах жизненного цикла химико–технологических систем

Кратко рассмотрим сущность основных этапов жизненного цикла (ЖЦ) химико–технологических систем и производственных объектов, практически реализуемых при выполнении **основных видов инжиниринга: предпроектные исследования, планирование бизнес–процессов, проектирование, специальные послепроектные разработки.**

Предпроектные исследования – анализ рынка (маркетинг) продукции и услуг, подготовка технико–экономического обоснования проекта создания ХТС, технической системы или производственного объекта (предприятия, ЦП), составление бизнес–плана, инженерные изыскания (топографическая съемка, исследование грунтов, разработка планов развития регионов, транспортной системы и другой инфраструктуры, а также консультации и надзор за проведением данных работ.

Составление бизнес–плана проекта, который представляет собой коммерческий документ, всесторонне обосновывающий целесообразность реализации проекта и оценивающий желаемые результаты этого проекта.

Составление бизнес–план организации, представляющего собой специально структурированный документ, в котором описываются все основные виды и аспекты организационно–управленческой, финансово–экономической и предпринимательской деятельности будущей организации (предприятия, компании, фирмы) с использованием методологии **SWOT–анализа** (*Strengths–Weaknesses–Opportunities–Threats*) анализируются **сильные и слабые стороны** ее деятельности, ее внутренние **возможности и внешние угрозы** для этой деятельности, все возможные главные проблемы и риски, с которыми может столкнуться данная организация при реализации ее миссии, и определяются основные направления и способы решения указанных проблем.

Проектирование (разработка проекта) – подготовка генплана производства или предприятия, разработка архитектурного плана, оценка стоимости проекта, расчёт расходов по созданию и эксплуатации технических

систем, разработка рабочих чертежей, технических спецификаций и другой проектной документации, надзор и консультации по проведению всех видов проектных работ.

Послепроектные разработки – подготовка контрактной документации для выполнения различных инженерно–технических и организационно–управленческих работ, а также различных бизнес–процессов по строительству и пуску в эксплуатацию технической системы или производственного объекта, организация торгов при необходимости, авторский надзор за проведением строительных работ, управление строительством, проведение приёмо–сдаточных работ и производственных испытаний, составление заключительной сводной строительной и технической документации, подготовка инженерно–технического персонала и другие работы по сдаче и пуску технической системы или производственного объекта.

Специальные разработки и услуги, обусловленные конкретными условиями создания и эксплуатации данной технической системы, производственного объекта или предприятия (разработка аппаратурно–технической инфраструктуры, или логистической инфраструктуры, обеспечивающей безопасное функционирование технической системы, производственного объекта или предприятия; анализ проблем охраны окружающей среды от загрязнений и проблем утилизации отходов; анализ социально–экономических проблем; юридические процедуры и др.)

Рассмотрим более подробно сущность **CALS–технологий**, обеспечивающих реализацию основных процедур компьютеризированного инжиниринга. **Глобальные сетевые информационно–коммуникационные технологии** и **CALS–технологии** обеспечивают создание **Единого информационного пространства (ЕИП)**, или **Единой информационной среды (ЕИС)**, для взаимодействия и принятия при различных видах инжиниринга любых параллельно–последовательных решений, выполняемых различными специалистами.

В отличие от **PLM–технологий** непрерывной компьютерной поддержки полного ЖЦ изделия, которые обеспечивают решение всех задач с исполь-

зованием комплексов взаимосвязанных программных продуктов **одного крупного разработчика программного обеспечения**, что приводит к возникновению серьезной проблемы зависимости пользователя от программных продуктов этого разработчика, **ЕИП** и **CALS–технологии** реализуются на основе применения серии **Международных стандартов (ISO)** представления данных, основным из которых является стандарт **ISO 10303 STEP (Standard for Exchange of Product model data** – Стандарт обмена данными о модели продукта (изделия)). Этот Международный стандарт регламентирует логическую структуру базы данных (БД) и номенклатуру информационных объектов, хранимых в БД.

CALS–технологии – это совокупность программно–информационных средств и комплексов, реализующих непрерывную интегрированную информационную логистическую поддержку всего ЖЦ изделия, продукта, технической системы или производственного объекта (включая этапы его проектирования и эксплуатации). **CALS–технологии** являются мощным компьютерным инструментом современного системного подхода к организации инжиниринга при проектировании, эксплуатации, производстве, техническом обслуживании и ремонте оборудования, а также при поставках требуемому потребителю высокотехнологичной и наукоемкой продукции, заключающимся в использовании ЭВМ и различных БД, разнообразной компьютерной техники и современных ИКТ на всех этапах ЖЦ изделия (в том числе, создаваемого программного обеспечения (ПО) с применением **CASE–технологий (Computer–Aided Software Engineering)** – технологий автоматизированного (компьютеризированного) инжиниринга (разработки, или создания) ПО для решения разнообразных задач инжиниринга.

Развитие **CALS–технологий** позволяет создавать так называемые **распределенные виртуальные производства изделий** или **цифровизированные (цифровые) производства (digitalization or digital production (manufacture))**, в которых процесс разработки спецификаций с полной информацией, необходимой для изготовления изделия на программно управляемом технологическом оборудовании, может быть **распределен во време-**

ни и пространстве между многими организационно автономными инжиниринговыми коллективами.

1.3. Краткая характеристика инструментов компьютеризированного инжиниринга технических систем и бизнес–процессов

CALS–технологии являются мощным универсальным инструментом компьютеризированного инжиниринга комплексных общих проектов для разных организационно автономных коллективов, разделенных во времени и пространстве, которые используют следующие автоматизированные (компьютеризированные) инструменты и системы инжиниринга **CAE/CAD/CAM–системы**: **CAE (Computer–Aided Engineering)** – автоматизированные системы инжиниринга; **CAD (Computer–Aided Design)** – автоматизированные системы проектирования; **CAM (Computer–Aided Manufacturing)** – автоматизированные системы производства.

CAM–системы обеспечивают создание управляющих программ для изготовления сложнопрофильных изделий и сокращения цикла их производства на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). **CAM–системы** обеспечивают как компьютеризацию или цифровизацию **процессов технологической подготовки производства**, так и автоматизацию **производственных технологических процессов**. Одна и та же конструкторская документация, подготовленная **CAM–системами**, может быть использована многократно в разных проектах, а одна и та же технологическая документация может быть адаптирована к разным производственным условиям, что позволяет **существенно сократить и удешевить затраты на общий ЖЦ производственных систем**. Кроме того, упрощается эксплуатация и техническое обслуживание автоматизированных производственных систем.

Инжиниринг крупного общего проекта, выполняемого различными коллективами с использованием **CALS–технологий** на основе **принципа сквозного, или параллельного, проектирования**, обеспечивает передачу

результатов одного этапа проектирования на следующий этап в ЕИП. При этом изменения, вносимые на любом этапе проектирования, одновременно отображаются во всех частях крупного проекта. **Принцип сквозного проектирования позволяет контролировать целостность проекта, отслеживать внесение различных изменений в проектную документацию и синхронизировать их в реальном режиме времени.** СALS–технологии и принцип сквозного проектирования в настоящее время активно используются в инженерно–технологическом проектировании энергоресурсоэффективных производств и предприятий НГХК с широким применением методов и алгоритмов теории автоматизированного анализа, оптимизации и синтеза сложных ХТС, а также при организационно–функциональном проектировании и многопериодном планировании оптимальных энергоресурсоэффективных цепей поставок нефтегазохимического комплекса, включая системы газоснабжения.

С конца 1990–х – начала 2000–х гг. специалистами по теории организации и менеджмента бизнес–процессов (БП) активно развивается новое направление в инжиниринге и менеджменте БП – реинжиниринг существующих БП. Бизнес–процесс некоторой организации – это регулярно повторяющаяся совокупность логически взаимосвязанных упорядоченных типовых организационно–управленческих функций или мероприятий (работ, операций, процедур, действий), обеспечивающих целенаправленное функционирование данной организации в соответствии с ее социально–экономическим назначением, или миссией.

Реинжиниринг БП (*Business process reengineering – BRP*) – это инжиниринговая и организационно–управленческая деятельность по фундаментальному переосмыслению и радикальному перепроектированию логико–информационных моделей БП некоторой организации (предприятия, компании, фирмы и т.п.) для достижения максимальной результативности и эффективности производственно–хозяйственной и финансово–экономической деятельности организации в соответствии с комплексными **ключевыми индикаторами производительности (*Key Performance Indicators –***

КРІ), оформленные соответствующими организационно–распорядительными и нормативными документами. Для выполнения реинжиниринга БП используют специальные компьютерно–информационные инструменты и средства представления и обработки деловой, инженерно–технической и финансово–экономической информации, понятные как менеджерам, так и разработчикам информационных систем.

Реинжиниринг БП состоит из двух основных этапов:

1. Разработка оптимальной логико–информационной модели БП (в первую очередь основного);
2. Определение наилучшего (по средствам, времени, ресурсам и т.п.) способа оптимального изменения существующих БП.

Обобщенный алгоритм реинжиниринга БП некоторой организации состоит из следующих основных шагов:

1. Разработать корпоративную стратегию устойчивого развития организации.
2. Определить ключевые компетенции различных специалистов, которые обеспечат реализацию стратегии.
3. Выполнить системный анализ логико–информационной модели существующих БП.
4. Определить требуемые изменения БП.
5. Определить значения [ключевых показателей производительности](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ключевые_показатели_производительности)² (эффективности) БП – КРІ.
6. Выполнить процедуру реинжиниринга, или изменения, логико–информационной модели БП.
7. Контролировать и постоянно совершенствовать новые БП на основе выбранных установленных значений КРІ организации

Для разработки **логико–информационных моделей БП** необходимо использовать методологию функционального моделирования сложных БП и технических систем, а также широко применять семейство стандартизированных компьютерных инструментальных средств «**Компьютерно–ин-**

² https://ru.wikipedia.org/wiki/Ключевые_показатели_эффективности

тегрированные производства» (*Integrated Computer–Aided Manufacturing – ICAM*), которые включают компьютерные инструменты «интегрированного определения» (*Integrated DEFinition – IDEF*). Семейство IDEF, включает следующие 15 стандартов: IDEF0÷IDEF14. Приведем краткую характеристику этих стандартов.

IDEF0 «*Function Modeling*»³ – методология и компьютерные инструменты **функционального моделирования технических и социально–экономических систем**. С использованием наглядного графического языка IDEF0 бизнес–процессы функционирования изучаемой технической системы отображаются в виде набора логико–информационных взаимосвязанных функций, или функциональных блоков (в терминах стандарта IDEF0). Как правило, разработка логико–информационной модели с использованием компьютерных средств IDEF0 является первым этапом изучения любой системы. Методологию IDEF0 можно считать следующим этапом развития хорошо известного графического языка компьютерного логико–информационного моделирования процессов функционирования технических систем SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) – **методы структурного анализа и проектирования**.

IDEF1⁴ «*Information Modeling*»⁵ – методология и компьютерные инструменты **информационного моделирования, или моделирования информационных потоков**, внутри системы или БП, позволяющие отображать и анализировать их структуру и взаимосвязи между работами или элементами технических систем. В настоящее время **на основе совершенствования методологии IDEF1** создана её новая версия –методология IDEF1X (*IDEF1 Extended*) – «*Data Modeling*»⁶ – методология **моделирования данных** на основе модели «**сущность–связь**». Методология IDEF1 применяется для построения логико–информационной модели, отображающей структуру информационных потоков, необходимую для реализации

3 <https://ru.wikipedia.org/wiki/Бизнес–процесс>

4 <https://ru.wikipedia.org/wiki/IDEF1>

5 <https://ru.wikipedia.org/wiki/DFD>

6 https://ru.wikipedia.org/wiki/ER–модель_данных

функций производственной системы или БП. Методология **IDEF1** позволяет разработать **реляционную модель базы данных (БД)**. **IDEF1X** разработана с учетом таких требований, как простота изучения и возможность компьютеризации. Далее **IDEF1X**–диаграммы последовательно используются рядом распространённых **CASE–средств** (в частности, **ERwin, Design/IDEF**).

IDEF2⁷ «*Simulation Model Design*» – методология и компьютерные инструменты **проектирования динамических моделей** развивающихся систем. В связи с трудностями анализа динамических систем от этого стандарта практически отказались, а его развитие приостановилось. В настоящее время существуют алгоритмы и реализующие их компьютерные программы, которые позволяют превращать набор статических диаграмм **IDEF0** в динамические модели, построенные на основе использования «раскрашенных сетей Петри» (**CPN – Color Petri Nets**).

IDEF3⁸ «*Process Description Capture*» – методология **документированного описания технологических систем и БП**, происходящих в системе (например, на предприятии), которая позволяет описывать сценарий и последовательность операций для каждого БП. Методология **IDEF3** непосредственно взаимосвязана с методологией **IDEF0** — каждая функция (функциональный блок) может быть представлена в виде отдельного БП средствами **IDEF3**.

IDEF4⁹ «*Object–Oriented Design*»¹⁰ – методология и компьютерные инструменты **объектно–ориентированного проектирования**, которые отображают структуру объектов и принципы их взаимодействия, тем самым позволяя анализировать и оптимизировать сложные БП и системы.

IDEF5¹¹ «*Ontology Description Capture*» – методология и компьютерные инструменты **описания онтологии сложных систем. Онтология системы**

7 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF2&action=edit&redlink=1>

8 <https://ru.wikipedia.org/wiki/IDEF3>

9 <https://en.wikipedia.org/wiki/IDEF4>

10 https://ru.wikipedia.org/wiki/Объектно–ориентированное_проектирование

11 <https://en.wikipedia.org/wiki/IDEF6>

– это определенный *словарь (глоссарий) терминов, понятий и правил*, на основании которых могут быть сформулированы достоверные утверждения о состоянии рассматриваемой системы в некоторый момент времени, что позволяет формировать выводы о дальнейшем развитии системы и осуществлять оптимизацию режимов её функционирования.

IDEF6¹² «*Design Rationale Capture*» – методология и компьютерные инструменты **обоснования рациональных проектных действий**. IDEF6 облегчает получение (приобретение) «знаний о способе» моделирования, представления и использовании этих знаний при разработке систем управления предприятиями. Под «*знаниями о способе*» понимаются причины, обстоятельства и скрытые мотивы, которые обуславливают выбранные методы приобретения, разработки и применения «знаний о способе», которые представляют ответ на вопрос: «почему модель получилась именно такой?». Большинство инструментов и методов моделирования систем (*System Simulation*) сосредоточены на использовании собственно получаемых моделей, а не на процессе их разработки. Методология IDEF6 акцентирует внимание именно на процессе разработки модели (*System Modeling*) и обосновании промежуточных решений, что способствует приобретению и использованию рационального опыта проектирования в дальнейшем при модернизации разработанных систем.

IDEF7 «*Information System Auditing*» – методология и компьютерные инструменты **аудита информационных систем**.

IDEF8¹³ «*Interface Modeling*» – методология и компьютерные инструменты **моделирования интерфейсов пользователя**, т.е. взаимодействия оператора и компьютерной информационной системы. Современные программные среды разработки пользовательских интерфейсов в основном создают внешний вид интерфейса. IDEF8 сосредотачивает внимание разработчиков интерфейса на программировании процедур желаемого активного взаимодействия интерфейса и пользователя на трех уровнях:

- выполняемой операции (какая это операция);

12 <https://en.wikipedia.org/wiki/IDEF6>

13 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF8&action=edit&redlink=1>

- сценария взаимодействия, определяемом специфической ролью пользователя (по какому сценарию операция должна выполняться тем или иным пользователем);
- подробных функций интерфейса (какие операции управления предлагает интерфейс для выполнения операции).

IDEF9¹⁴ «*Scenario–Driven IS Design*» (*Business Constraint Discovery method*) – методология и компьютерные инструменты **исследования бизнес–ограничений**, которые позволяют обнаруживать и анализировать ограничения в условиях функционирования предприятия. Обычно, при построении моделей БП на предприятии недостаточное внимание уделяется описанию влияющих на их протекание ограничений. Знания об основных ограничениях и характере их влияния позволяют совершенствовать или адаптировать организационно–функциональную структуру предприятия и логико–функциональной модели БП к прогнозируемым изменениям. Знания о существующих ограничениях имеют важное значение для организационно–функционального проектирования предприятий и реинжиниринга БП.

IDEF10 «*Implementation Architecture Modeling*» – моделирование реализуемой архитектуры организации.

IDEF11¹⁵ «*Information Artifact Modeling*» – моделирование информационных артефактов.

IDEF12¹⁶ «*Organization Modeling*» – организационное моделирование (проектирование).

IDEF13¹⁷ «*Three Schema Mapping Design*» – проектирование трёхсхемной карты данных.

IDEF14¹⁸ «*Network Design*» – проектирование компьютерных сетей.

14 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF9&action=edit&redlink=1>

15 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF11&action=edit&redlink=1>

16 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF12&action=edit&redlink=1>

17 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF13&action=edit&redlink=1>

18 <https://ru.wikipedia.org/w/index.php?title=IDEF14&action=edit&redlink=1>

Широкое применение современных методов и инструментов компьютеризированного или цифровизированного инжиниринга позволяют разрабатывать проекты и осуществлять автоматизированное управление эксплуатацией энергоресурсосберегающих высоконадежных экологически безопасных ХТС производства конкурентоспособной продукции с высокой добавленной стоимостью, выполнять проекты организационно-функциональных структур энергоресурсосберегающих ЦП, осуществлять оптимальное стратегическое планирование и управление ЦП нефтегазохимического комплекса.

1.4. Понятия анализа, оптимизации и синтеза химико-технологических систем

При поиске научно обоснованных решений разнообразных задач **инжиниринга** на этапах эксплуатации, реконструкции и проектирования энергоресурсосберегающих ХТС возникают три вида научно-исследовательских операций: анализ, оптимизация и синтез ХТС.

Анализ ХТС – это операция определения для данной ХТС при заданных технологической топологии, конструкционных и технологических параметрах каждого элемента системы, а также при известных входных переменных ХТС значений промежуточных и выходных переменных, показателей свойств и КЭ функционирования ХТС.

Оптимизация ХТС – это операция определения для данной ХТС при заданных технологической топологии, типоконструкциях каждого элемента, при известных входных переменных и при ограничениях на значения параметров технологических режимов каждого элемента таких значений параметров технологических режимов, а также конструкционных и технологических параметров элементов, которые обеспечивают оптимальное значение КЭ функционирования ХТС.

Основная цель анализа ХТС состоит в том, чтобы математически связать характеристики состояния системы с параметрами и характеристиками состояния отдельных элементов (подсистем) в зависимости от структуры

технологических связей между элементами (подсистемами) ХТС. На практике при решении задач проектирования сложных ХТС, реконструкции и оптимизации технологических режимов действующих ХТС задачи анализа наиболее часто трактуются как задачи оценки эффективности возможных альтернативных вариантов системы. Для каждого из альтернативных вариантов ХТС необходимо с использованием математической модели системы вычислить совокупность показателей свойств и КЭ системы. Сопоставляя значения этих показателей свойств и критериев эффективности ХТС, можно получить представление о недостатках и преимуществах каждого из вариантов системы.

Необходимо заметить, что при выборе наилучшего, или оптимального варианта, ХТС нужно обращать внимание не только на то, чтобы показатели свойств системы имели оптимальные значения, но также и на стабильность значений этих показателей при изменении в определенных пределах самих параметров системы, т.е. всегда учитывать показатели чувствительности ХТС. Значение показателей чувствительности ХТС часто оказывается решающим при окончательной оценке качества функционирования рассматриваемого варианта системы.

Синтез ХТС – это операция создания ХТС для производства заданной химической продукции с учетом определенных требований к функционированию ХТС, а также различных физико-химических и технологических ограничений на их выполнение. Эта операция включает выбор химического способа производства целевых продуктов, разработку технологической топологии системы (выбор видов ХТП, типо-конструкций каждого элемента, выбор структуры и определение покомпонентного состава технологических связей между элементами), определение конструкционных и технологических параметров каждого элемента, обеспечивающих функционирование ХТС при оптимальной величине КЭ и оптимальных показателях свойств ХТС.

Рассмотрим особенности процедур поиска решений задач анализа, оптимизации и синтеза ХТС. Процедуры поиска решений задач анализа ХТС-

это совокупность различных *формализованных вычислительных процедур*, которые могут автоматизированно выполняться ЭВМ по определенному алгоритму без участия человека. Процедуры поиска решений задач оптимизации ХТС представляют собой многократно повторяемые процедуры анализа ХТС при различных допустимых значениях управляющих, или оптимизирующих, переменных ХТС.

Принципиальная особенность поиска решений *неформализуемых задач* синтеза ХТС состоит в сочетании как творческих интеллектуальных процедур, так и обычных вычислительных процедур. *Творческими интеллектуальными процедурами*, которые не поддаются полной формализации и алгоритмизации, при поиске решений задач синтеза оптимальных и ресурсосберегающих ХТС являются, например, процедуры выбора химического способа производства продуктов, выбора типов ХТП и типо-конструкций аппаратов, создания структуры технологических связей между аппаратами. Указанные творческие интеллектуальные процедуры могут осуществляться только лицом, принимающим решения (ЛПР), в *режиме интеллектуального диалога* с ЭВМ. Интеллектуальный диалог ЛПР с ЭВМ, который должен проводиться на *ограниченном естественном языке* (ОЕЯ), позволяет в наиболее полной мере эффективно использовать как творческие способности мышления ЛПР, так и вычислительные возможности ЭВМ при поиске решений неформализуемых задач синтеза ХТС.

Глава 2. Основные направления обеспечения энергоресурсосбережения в химико–технологических системах

2.1. Энергоресурсосбережение как важнейший научно–технологический и организационно–экономический фактор перехода к устойчивому развитию

Энергоресурсосбережение в промышленности или на производстве — это целенаправленная совокупность разнообразной научно–исследовательской, образовательной, проектно–конструкторской, производственно–хозяйственной, производственно–экономической, управленческой и торговой деятельности, выполняемой на основе наиболее полного использования интеллектуальных и информационных ресурсов общества для обеспечения оптимальных удельных расходов всех видов природных, включая энергию, материальных и трудовых ресурсов, которые необходимы для выпуска в требуемое время требуемого вида требуемого количества и качества продукции (товаров или услуг) с соблюдением условий национального и международного законодательства, а также условий защиты окружающей среды от загрязнений.

Энергоресурсосберегающие экологически безопасные технологические системы химических и металлургических производств являются объективным экономическим фактором устойчивого развития. Для практической реализации концепции устойчивого развития особую важность приобретает также решение задач эколого–экономического анализа и оптимизации воздействия промышленных предприятий на окружающую природную среду (ОПС). Методы эколого–экономического анализа и оптимизации предприятий позволяют определять оптимально допустимый уровень воздействия газовых и жидких выбросов предприятий, а также твердых отходов на различные окружающие промышленное предприятие природные системы (леса, атмосферу, гидросферу и литосферу) при ограничениях на финансирование природоохранных мероприятий.

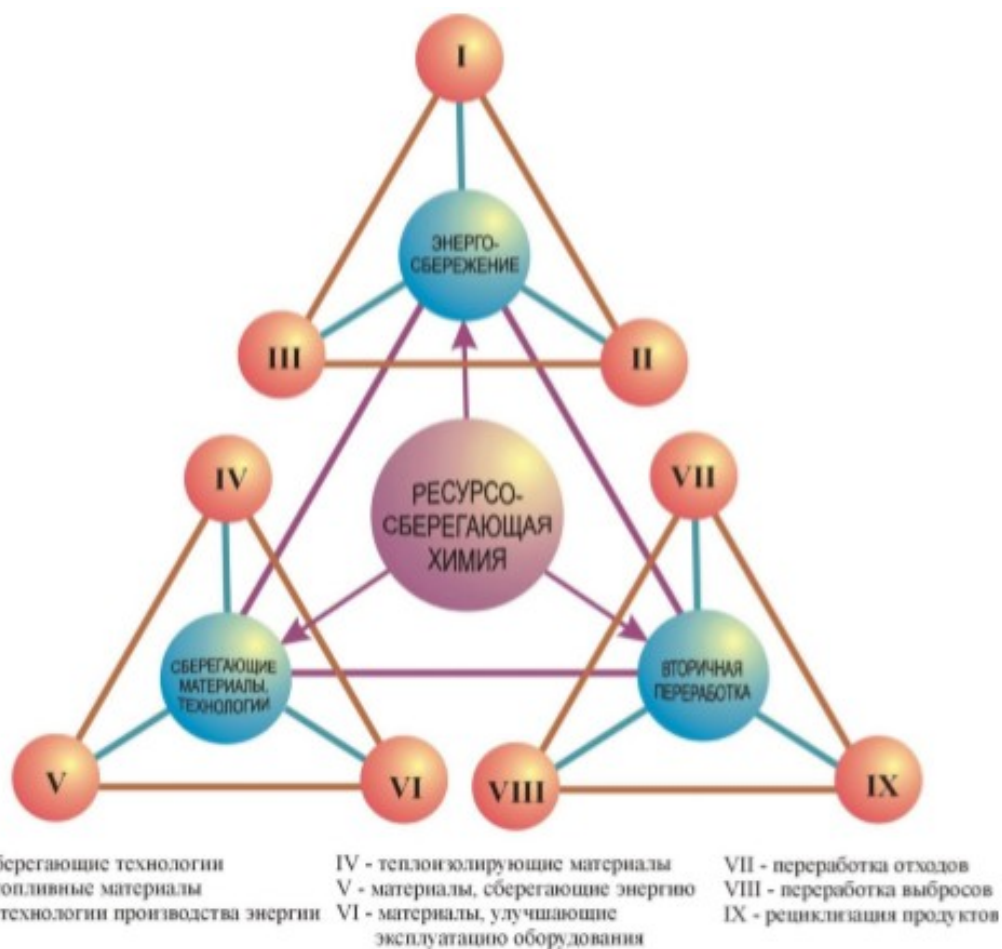


Рисунок 2.1.1. Схема фрактального представления ресурсосберегающей химии.

Общество обязано понимать и помнить об ограниченности ресурсов и восстанавливающей способности окружающей среды, а потому должно заботиться о **рациональном использовании ресурсов**. В противном случае, не будет выполняться основной **принцип устойчивого развития** — обеспечение потребностей развития будущих поколений. Многие специалисты считают, и не без оснований, что именно правильное использование ресурсов — ключ к реализации парадигмы. Так авторы одного из докладов Римскому Клубу И. Вайнзейкер и др. говорят о факторе четыре, который основывается на двукратном увеличении производства продуктов и услуг при одновременном двукратном уменьшении используемых ресурсов. Другие специалисты считают, что необходим фактор большей величины, но, по-видимому, на данный момент важна не цифра, а сам факт настройки на идеологию получения максимального продукта, при использовании минимума ресурсов.

Таблица 2.1.1. Основные источники загрязнения атмосферы, %

| № п/п | Отрасль народного хозяйства | Россия | | США | |
|----------|-----------------------------|--------|------|-----|------|
| | | | | | |
| 1 | Электроэнергетика | 32 | | 14 | |
| 2 | Транспорт | 26 | | 60 | |
| 3 | Металлургия | 20 | } 32 | | } 17 |
| 4 | Химическая промышленность | 5 | | | |
| 5 | Производство нефти | 5 | | | |
| 6 | Производство бумаги | 2 | | | |
| 7 | Уничтожение отходов | ? | | 9 | |

Схематически ресурсосберегающую химию изобразим во фрактальной форме с треугольником в качестве элемента построения (рис. 2.1.1). В самой ресурсосберегающей химии можно выделить три направления:

- энергосбережение;
- сберегающие материалы и технологии;
- вторичная переработка.

Направления связаны между собой и потому соединены как стороны центрального треугольника, а каждая вершина (направление) разбита соответственно на три под направления (рис. 2.1.1).

Энергия — необходимый элемент для деятельности живого организма, сообщества, а так же для любой химической и физической системы. Для поднятия общего жизненного уровня населения планеты, достигнутого в развитых странах, потребуется почти десятикратное увеличение энергетического производства, реально это невозможно из-за ограниченности и усложнения добычи основных энергоресурсов, а также из-за губительного воздействия энергетических объектов на окружающую среду (табл. 2.1.1).

Анализ энергетических потерь удобно проводить поэтапно, прослеживая, как это сделано в работе академика В.А. Легасова, от содержания топлива в природе до потребления энергии. Этапы характеризуются показателем извлечения (добычи) топливного сырья ($K_1=0,4$); потерями сырья при

транспортировке ($K_2=0,9$); потерями при переводе тепловой энергии в электрическую ($K_3=0,4$); потерями при передаче электроэнергии ($K_4=0,9$) и потерями потребителей ($K_5=0,9$). Как видно, коэффициент полезного действия оказывается до обидного мал (11,6%). Разумеется, выигрыша можно добиться за счет экономии и рационального использования выработанной энергии:

- децентрализации энергетической инфраструктуры;
- приближения производства к источникам энергии;
- диверсификации способов получения энергии, с привлечением нетрадиционных методов.

Однако это не сможет обеспечить требуемого увеличения энергии, а потому необходим переход к деятельности, обеспечивающей уменьшение потребления энергии по отношению к валовому национальному продукту, и создание кардинально новых более эффективных способов получения энергии. В этом плане возможности химии велики, достаточно вспомнить, что введение катализаторов в производство моторного топлива увеличило валовой национальный продукт Соединенных Штатов на четверть. Первое направление, где химия может быть эффективной — разработка технологий, обеспечивающих уменьшение затрат энергии на производство единицы продукта. Второе — создание новых видов химического топлива, обеспечивающих энергетическую и экологическую эффективность, к примеру, водородная энергетика. Третье — новые эффективные технологии получения энергии, как с известными, так и с новыми энергоносителями, например, сжигание в кипящем слое. Следует отметить, что энергия наиболее уязвимый ресурс для сохранности — она наиболее рассеивающаяся, быстро и необратимо переходит в другие формы.

Следующее направление ресурсосберегающей химии (рис. 2.1.1 – сберегающие материалы. Они включают материалы, обеспечивающие сохранность энергии и ее полезное использование, к примеру: теплоизоляционные. Сюда же следует отнести материалы, улучшающие эксплуатацию и сроки работы оборудования, механизмов. Это защитные и износостойкие

материалы. Надо отметить эксплуатационные материалы (например, смазывающие), которые должны функционировать максимально долго и эффективно, обеспечивая длительный моторесурс оборудования, механизмов. Сберегающие материалы должны обеспечить меньшее потребление ресурсов (энергетических, материальных, территориальных, кадровых) на производимую единицу продукции.

Третий элемент фрактала — вторичная переработка. Он включает переработку отходов, а так же более глубокую переработку сырья, поскольку зачастую в производстве используется его малая доля. К глубокому сожалению, в настоящее время степень рационального использования сырья удручающе низка, особенно в России. Продемонстрируем это на сопоставлении данных по переработке древесины в мире и в России: эффективность переработки древесины в мире 50–70%, тогда как в России — 15%, соответственно переработка отходов 50% и 8%. В другой ресурсной отрасли — горнорудной промышленности, из минерального сырья извлекается один–два продукта, а остальные компоненты уходят в отвал. Связано это с тем, что в данный момент, для данного предприятия, выработка других продуктов нерентабельна, а иногда и просто не интересна. Химия бесспорно может помочь в технологическом решении этих вопросов. Нередко во время производства (в первую очередь химического) образуются сопутствующие вещества, которые выбрасываются, но в то же время могут быть сырьем для другого производства.

Еще один раздел — рециркуляция (возврат), повторная переработка из использованных продуктов, материалов, где также не обойтись без химии.

История производственной (индустриальной или промышленной) химии, по-видимому, начинается с тех времен, когда обжигали деревянные колья и керамические изделия, а золу вносили в почву в качестве удобрения. Технологические процессы, совершаемые с материалами, меняющие состав, агрегатное состояние, морфологию материалов под воздействием других химических объектов, относятся к производственной химии. По утверждению В.А. Легасова более семидесяти пяти процентов производи-

мых материалов в той или иной форме связаны с химической обработкой. Без химических процессов невозможно представить ни одну современную отрасль промышленности и строительства.

Таблица 2.1.2. Соотношение энергоносителей в топливно–энергетическом балансе мира.

| № п/п | Источник энергетики | Количество (10 ¹⁸ Дж/г) | Доля, % |
|-------|---------------------|------------------------------------|---------|
| 1 | Нефть | 126 | 40,4 |
| 2 | Природный газ | 60 | 19,3 |
| 3 | Уголь | 100 | 32,1 |
| 4 | Дрова + биомасса | ~10 | 3,2 |
| 5 | Гидроэнергетика | 5,5 | 1,8 |
| 6 | Ядерная энергетика | ~10 | 3,2 |
| 7 | Общий баланс | 311,5 | 100 |

Остановимся на некоторых вопросах энергетики и ее связи с химией. Из сопоставительного анализа долей энергоносителей в топливно–энергетическом балансе видно (табл. 2.1.2), что основной источник энергии (четыре первых позиции) связан с горением того или иного вида топлива — 95%. Следовательно, химические процессы в подавляющей доле определяют энергетику мира. Разумеется, данные несколько устарели, и изменилось соотношение долей, увеличивая вклад нетрадиционных методов (ветроэнергетика, солнечная энергетика), но доминанта химических процессов осталась. Без химии невозможна была бы и деятельность других энергетических направлений, в частности ядерной энергетики. Без соответствующих материалов (конструкционных, электропроводящих, изоляционных и т.д.) невозможно представить энергетическое оборудование, линии электропередач и устройств перевода электроэнергии в тепловую, световую, механические формы, необходимые в реальной жизни.

В ряде случаев, при добыче сырья, на первый взгляд, можно обойтись без химии: вали лес и свози «кругляк» за рубеж, добывай уголь и тоже продавай, но для современного устойчивого сообщества нужны высокотехнологичные продукты, производство которых невозможно без химии. Тем бо-

лее, что при вывозе сырья и обратном завозе продуктов из них, теряется значительная часть прибавочной стоимости капитала. Отсутствие высокотехнологичного производства грозит превратить страну в сырьевой придаток других государств, а такому обществу, как показывает опыт, трудно рассчитывать на устойчивое развитие. Следует вспомнить слова Д.И. Менделеева: «Нефть — столь редкий и исключительный дар природы чтобы сжигать его как простое топливо — просто грех... топить можно и ассигнациями».



Рисунок 2.1.2. Схема связи химии со сферами производства

Производственная химия связана со всеми основными отраслями производства (рис. 2.1.2), обеспечивая материальную базу существования общества, она охватывает масштабные отрасли промышленности, сельское хозяйство и переработку сельскохозяйственных продуктов, ресурсодобывающие отрасли, транспорт и строительство. Следует отметить, что роль производственной химии в мире растет, свидетельство тому ее вклад в наукоемкие отрасли. Большинство предприятий атомной промышленности тесно связаны с химическим производством. Материалы электроники и квантовой электроники созданы и производятся химиками, то же относится

к оптико–волоконным средствам связи. Несколько лет назад одним из основных достижений года в космонавтике был назван синтез нового окислителя, позволивший увеличить энергетику ракетных систем, очевидно также, что освоение космоса стало возможным лишь после того, как были созданы необходимые материалы и горючее. Значение производственной химии подчеркивает отмечавшийся во введении факт, что основным инновационным достижением XX века считают внедрение катализаторов в производстве моторного топлива.

Разумеется, что одна наука и, в частности, химия не смогут решить все проблемы перехода к устойчивому развитию. Необходимо подключение экономических, политических и этических механизмов и принципов в производственный процесс. Важны все механизмы, но особо отметим последний. Нельзя не согласиться с А. Мозером, утверждающим: «Вся техническая деятельность человека должна отвечать определенным экопринципам, которые формируются на основе системного анализа экосферы».

Инжиниринг и промышленная реализация энергоресурсоэффективных экологически безопасных ХТС и интенсивных ХТП на предприятиях и в цепях поставок НГХК, а также широкое использование концепций ресурсосберегающей химии и основных принципов «зелёной» химии в научно–технических разработках имеют существенное значение для практического достижения **целей устойчивого развития. Цели устойчивого развития (ЦУР)** (англ. **Sustainable Development Goals (SDGs)**), официально известные, как **Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития** на период до 2030 года (англ. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**) — это набор целей для будущего международного сотрудничества, которые планируется достигать с 2015 по 2030 годы. Итоговый документ «**Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года**» содержит **17 глобальных целей и 169 соответствующих задач.**

Концепция устойчивого развития появилась на основе объединения трех основных видов деятельности человечества: экономической, социаль-

ной и экологической. Устойчивое развитие подразумевает принятие и реализацию мер, направленных на оптимальное использование ограниченных ресурсов Земли и применение экологически дружелюбных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, на сохранение стабильности социальных и культурных систем, на обеспечение целостности биологических и физических природных систем, включая лесные и природные акватории.

Цели развития тысячелетия (ЦРТ), которые были ранее приняты на Генеральной Ассамблее ООН в 2000 году, установили 2015 год в качестве расчетного года. Так как страны, принявшие Программу ЦРТ, признали её успех, так же, как и необходимость принятия новой повестки дня после 2015 года, в 2012 году на Конференции ООН по устойчивому развитию страны приняли решение о создании рабочей группы открытого состава для разработки нового комплекса ЦУР.

После более чем года переговоров Рабочая группа открытого состава представила рекомендации для определения 17 целей в области устойчивого развития. 25 сентября 2015 года в штаб-квартире ООН в Нью-Йорке мировые лидеры, в том числе главы государств и правительств, одобрили Повестку дня в области устойчивого развития на период до 2030 года, реализация которых обеспечит избавление человечества от нищеты и «исцеление» планеты.

Цели развития тысячелетия (ЦРТ), которые были ранее приняты на Генеральной Ассамблее ООН в 2000 году, установили 2015 год в качестве расчетного года. Так как страны, принявшие Программу ЦРТ, признали её успех, так же, как и необходимость принятия новой повестки дня после 2015 года, в 2012 году на Конференции ООН по устойчивому развитию страны приняли решение о создании рабочей группы открытого состава для разработки нового комплекса ЦУР.

После более чем года переговоров Рабочая группа открытого состава представила рекомендации для определения 17 целей в области устойчивого развития. 25 сентября 2015 года в штаб-квартире ООН в Нью-Йорке

мировые лидеры, в том числе главы государств и правительств, одобрили Повестку дня в области устойчивого развития на период до 2030 года, реализация которых обеспечит избавление человечества от нищеты и «исцеление» планеты.

Новые цели и задачи устойчивого развития носят комплексный и взаимосвязанный характер, обеспечивая сбалансированность всех трех компонентов устойчивого развития:

- экономического,
- социального,
- экологического.

25 сентября 2015 года 193 страны приняли следующие **17 глобальных целей устойчивого развития**:

1. **Повсеместная ликвидация нищеты во всех её формах.**
2. Ликвидация голода, обеспечение продовольственной безопасности и улучшение питания и содействие устойчивому развитию сельского хозяйства.
3. Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте.
4. **Обеспечение всеохватного и справедливого качественного образования и поощрение возможности обучения на протяжении всей жизни для всех.**
5. Обеспечение гендерного равенства и расширение прав и возможностей всех женщин и девочек.
6. Обеспечение наличия и рациональное использование водных ресурсов и санитарии для всех.
7. **Обеспечение доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех.**
8. Содействие неуклонному, всеохватному и устойчивому экономическому росту, полной и производительной занятости и достойной работе для всех.

9. Создание прочной инфраструктуры, содействие обеспечению всеохватной и устойчивой индустриализации и внедрению инноваций.
10. **Снижение уровня неравенства внутри стран и между ними.**
11. Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и устойчивости городов и населенных пунктов.
12. Обеспечение рациональных моделей потребления и производства.
13. **Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями.**
14. Сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития.
15. Защита, восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное управление лесами, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биологического разнообразия.
16. **Содействие построению миролюбивых и открытых обществ в интересах устойчивого развития, обеспечение доступа к правосудию для всех и создание эффективных, подотчетных и основанных на широком участии учреждений на всех уровнях.**
17. Укрепление средств достижения устойчивого развития и активизация работы механизмов глобального партнерства в интересах устойчивого развития.

Планируется, что работа над достижением ЦУР, начатая 1 января 2016 года, успешно завершится к 31 декабря 2030 года. Однако некоторые задачи, разработанные на основе ранее заключенных международных соглашений, будут решены, как ожидается, даже раньше конца 2030 года.

Хотя реализация программы ЦУР ещё не закончилась, можно предположить, что она сыграет основополагающую роль в решении глобальных проблем, учитывая успех программы Целей Развития Тысячелетия. Официально заявлено ООН, что за последние почти два десятилетия удалось почти вдвое сократить процент людей, живущих за чертой бедности, почти

вполовину уменьшить детскую и материнскую смертность, значительно продвинуться в деле борьбы с такими болезнями, как ВИЧ и малярия, а также более, чем в два раза увеличить объем помощи, предоставляемой развитыми странами в целях развития отстающих и слаборазвитых государств.

2.2. Краткая характеристика химико–технологических систем как объектов инжиниринга

Химико–технологическая система (ХТС) — это совокупность взаимосвязанных технологическими потоками (ТП) и действующих как единое целое аппаратов и машин химической технологии, в которых осуществляется либо одна отдельная или определенная комбинация из трех основных технологических операций:

- подготовка сырья и топливно—энергетических ресурсов (ТЭР);
- химического синтеза молекул целевых продуктов;
- выделения целевых продуктов требуемого качества, обеспечивающих выпуск требуемого качества целевых продуктов при выполнении требований защиты окружающей среды (ОС) от загрязнений.

Любая ХТС, которая соответствует производствам, или установкам, НГХК, химической, нефтехимической, электрохимической, металлургической и металлообрабатывающей промышленности, как объект исследования имеет определенную технологическую структуру и заданные параметры, а взаимодействие ХТС с окружающей средой и результаты ее функционирования можно охарактеризовать входными и выходными переменными, представляющими собой некоторые информационные сигналы (рис. 2.2.1). Технологическая структура, или технологическая топология ХТС — это строение и внутренняя форма организации системы, отражающая состав элементов и особенности взаимосвязей между ними. Технологическую структуру (технологическую топологию) ХТС (G) формально можно охарактеризовать числом элементов определенного конструкционного типа N , в которых протекают химико–технологические процессы

(ХТП) $g_э$, известным законом взаимосвязей между отдельными элементами R и числом технологических потоков $N_{m,n}$:

$$G = G\{N_э(g_э), R, N_{m,n}\} \quad (2.2.1)$$

Параметры ХТС — это физические и химические величины, которые характеризуют особенности протекания различных физико–химических явлений в каждом ХТП, условия проведения и особенности инженерно–аппаратурного оформления каждого ХТП системы. Параметры ХТС подразделяют на конструкционные и технологические.



Рисунок 2.2.1. Блок–схема ХТС как объекта исследований.

Конструкционные параметры ХТС (\bar{K}) — это геометрические характеристики конструкций элементов системы (например, объем, площадь сечения, диаметр и высота аппарата; размеры слоя насадки в аппарате ит. д.). Технологические параметры ХТС (\bar{D}) — это физико–химические величины, которые характеризуют свойства, механизм и кинетику ХТИ, происходящие в элементах системы (например, константы скорости химических реакций, коэффициенты тепло– и массопередачи и т.д.). Параметры технологического режима \bar{W} — это основные физико–химические факторы внутри элементов системы, которые влияют на скорость ХТП, на выход и качество химических продуктов (например, температура, давление, гидравлические условия перемещения потоков компонентов, концентрации веществ, активность катализатора и т.д.).

Выходные переменные ХТС (\bar{Y}) — это параметры выходных технологических потоков (ТП) системы. Параметры i -го ТП подразделяют на параметры состояния потока (массовый расход m_i ; объемный расход v_i , концентрации химических компонентов $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i\alpha}$, давление p_i , температура t_i ,

расход теплоты Q_i и т.д.) и параметры свойств потока (теплоемкость c_i , вязкость μ_i , плотность ρ_i , и т.д.) Каждый i -й ТП характеризуют определенным числом независимых параметров, которое называют параметричностью потока π_i . В общем случае для произвольных ХТС параметричность различных ТИ не является одинаковой, т.е. $\pi_i \neq \pi_j$.

Входные переменные ХТС (\bar{X}) — это параметры входных ТП системы, а также параметры различного рода физико-химических воздействий окружающей среды на ХТС (температура, давление, влажность, радиоактивное излучение и т. п.).

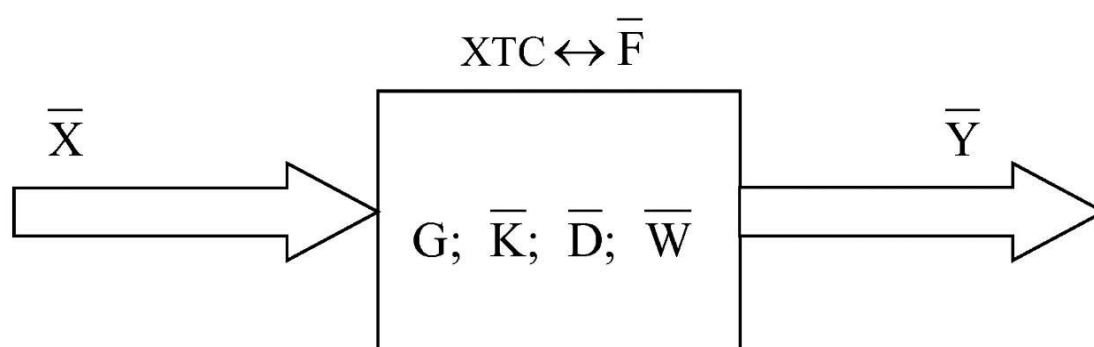


Рисунок 2.2.2. \bar{X} – вектор входных переменных; \bar{Y} – вектор выходных переменных, или переменных состояния ХТС; G – технологическая топология; \bar{K} – вектор конструкционных параметров; \bar{D} – вектор технологических параметров; \bar{W} – вектор параметров технологического режима; \bar{F} – функция; \leftrightarrow – математический символ «соответствие».

При математическом моделировании ХТС, решении задач анализа и синтеза ХТС используют понятия: состояние ХТС, пространство состояний ХТС, переменные состояния. Состояние ХТС — это набор выходных переменных ХТС, который полностью характеризует функционирование системы в каждый момент времени t (рис. 2.2.2). Пространство состояний ХТС — это вся совокупность наборов выходных переменных ХТС на некотором интервале времени наблюдений Δt . Выходные переменные ХТС часто также называют переменными состояния, или фазовыми переменными.

Состояние системы зависит от технологической структуры и параметров ХТС, от параметров технологического режима ее элементов и от воз-

действия на ХТС входных переменных. Математическую модель ХТС, которая отображает состояние системы, можно записать в следующем формальном виде:

$$\bar{Y} = \bar{F}(\bar{X}, G, \bar{K}, \bar{D}, \bar{W}, \tau), \quad (2.2.2)$$

где \bar{F} — векторная функция векторных аргументов $\bar{X}, \bar{K}, \bar{D}, \bar{W}$ и скалярного аргумента τ (время), которая зависит также от особенностей технологической структуры ХТС (G). Векторная функция \bar{F} считается принадлежащей некоторому классу функций, допускающему существование решения уравнения (2.2.2), которое можно найти с использованием либо аналитических, либо численных методов.

Каждая ХТС обладает разнообразными свойствами. Свойство ХТС — это определенная специфическая характеристика системы, которая обуславливает особенности ее функционирования, различие или сходство системы с другими системами и проявляется либо во взаимосвязях между элементами данной ХТС, либо во взаимодействии этой системы с другими ХТС и окружающей средой. К важнейшим свойствам ХТС относятся: надежность, безопасность, чувствительность, устойчивость и др. Количественную информацию о состоянии ХТС и о свойствах ХТС можно получить либо экспериментально в условиях эксплуатации системы, либо расчетным способом, используя определенную математическую модель (ММ) системы. Для наглядного представления многомерные массивы этой информации в различные моменты времени и при различных условиях должны быть сведены к ограниченному числу некоторых оценок, или количественных характеристик каждого свойства ХТС, которые также называются показателями свойств ХТС.

Каждый показатель свойства ХТС (S) должен удовлетворять, по крайней мере, следующим требованиям:

- представлять собой величину, которая зависит от состояния ХТС и довольно просто вычисляется с использованием определенной ММ системы на ЭВМ;

- давать наглядное количественное представление об одном из свойств ХТС;
- допускать в пределах возможного простую приближенную оценку своих значений по экспериментальным данным.

Качество функционирования ХТС можно охарактеризовать совокупностью свойств, определяющих техническое состояние и степень пригодности данной системы к выполнению заданных целей функционирования.

Для оценки качества функционирования ХТС используют разнообразные критерии эффективности. Критерий эффективности (КЭ) ХТС (Ψ) — это некоторый показатель, по которому оценивают степень приспособленности ХТС к выполнению поставленных целей функционирования. КЭ необходимы для определения оптимальных параметров элементов и технологических режимов ХТС, для сравнительной оценки альтернативных вариантов ХТС при решении задач реконструкции и проектирования объектов химической промышленности, для сравнительной оценки качества различных алгоритмов управления ХТС и т.д.

КЭ, чтобы достаточно полно определять качество или эффективность функционирования ХТС, должен учитывать особенности технологической топологии и основные свойства системы, а также технологические режимы ее функционирования и условия взаимодействия ХТС с окружающей средой. В общем случае КЭ представляет собой некоторый функционал вида:

$$\Psi = \Psi(G, \bar{K}, \bar{D}, \bar{X}, \bar{Y}, \bar{W}, \bar{S}), \quad (2.2.3)$$

где G — технологическая топология; $\bar{K}(\bar{D})$ — вектор конструкционных (технологических) параметров; $\bar{X}(\bar{Y})$ — вектор входных (выходных) переменных; \bar{W} — вектор параметров технологического режима элементов; \bar{S} — вектор показателей свойств системы.

Зависимости вида (2.2.3) для КЭ сложных ХТС с учетом широкого круга действующих факторов, как правило, являются весьма громоздкими. Расчет значений КЭ сложной ХТС требует разработки специальных алгоритмов и применения быстродействующих ПК.

В условиях эксплуатации при воздействии на ХТС разного рода возмущений возникает необходимость управлять системой, т.е. выполнять определенное изменение состояния данной ХТС, ведущее к достижению поставленных целей функционирования в соответствии с выбранным КЭ.

В общем случае автоматизированное управление процессом функционирования ХТС осуществляется на двух иерархических уровнях:

- **технологическом** — с использованием различных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП);
- **организационно–хозяйственном** — с использованием различных АСУ производствами или предприятиями (АСУП).

Каждая автоматизированная технологическая установка (производство), технологический узел и технологический блок как кибернетическая система представляют собой совокупность определенного вида ХТС и определенной АСУ, которые, действуя совместно, обеспечивают либо выполнение некоторой технологической операции переработки сырья и ТЭР, либо получение требуемых продуктов и полупродуктов при выполнении требований защиты окружающей природной среды от загрязнений.

Исходя из особенностей технологической топологии, ХТС классифицируют по видам элементов и типам технологических связей. В зависимости от видов элементов, или технологических операторов (ТО), соответствующих типовым процессам химической технологии и входящих в структуру ХТС, выделяют однородные и неоднородные ХТС.

Однородные ХТС состоят из одного вида элементов, в которых протекают одинаковые химико–технологические процессы (ХТП). Так, однородными ХТС являются реакторные системы (РС), теплообменные системы (ТС), системы ректификации (СР) многокомпонентных смесей, системы абсорбции (СА), системы экстракции (СЭ) и др. Однородные ХТС, как правило, соответствуют технологическим блокам производств.

Неоднородные ХТС состоят из разного вида элементов, в которых протекают различные ХТИ. Неоднородные ХТС соответствуют либо технологическим узлам производств, в которых реализуются отдельные основные

технологические операции (подготовка сырья, химический синтез молекул продуктов и полупродуктов, выделение целевых продуктов электро-химические установки, установки очистки газовых выбросов и очистки сточных вод от загрязнений), либо технологическим установкам (производствам), выпускающим определенные продукты.

Любую автоматизированную сложную ХТС (СХТС), соответствующую технологической установке, или производству для выпуска некоторого продукта и полупродуктов, можно рассматривать как трехуровневую (трехслойную или трехранговую) иерархическую систему. Для строго упорядоченной функционально-организационной структуры иерархической СХТС характерна следующая особенность: совокупность нескольких элементов или подсистем каждого нижнего i -го уровня иерархии образует одну подсистему следующего верхнего $(i+1)$ -го уровня иерархии СХТС.

Основу 1-го уровня иерархической структуры СХТС образуют отдельные элементы или ХТП и локальные системы автоматического управления (САУ) ХТП. Основу 2-го уровня образуют однородные малые ХТС (МХТС), соответствующие технологическим блокам, и АСУ ТП этих блоков. Основу 3-го уровня иерархической структуры СХТС образуют неоднородные ХТС, соответствующие отдельным технологическим узлам производства и АСУ ТП этих узлов.

Взаимодействие между отдельными типовыми ТО, отображающими функционирование каждого элемента ХТС, а также между различными ТО и подсистемами данной ХТС осуществляется с помощью технологических связей (или соединений), каждой из которых соответствует определенный ТП.

Технологическую топологию ХТС отображают, используя разнообразные схемы:

- технологические,
- структурные,
- операторные,
- функциональные.

В зависимости от типа технологических связей в структуре ХТС выделяют однонаправленные и встречнонаправленные ХТС. Однонаправленные ХТС — это системы, содержащие однонаправленные технологические связи, последовательные, последовательно–обводные и параллельные. Однонаправленные ХТС могут быть простыми и сложными.

Простые однонаправленные ХТС в своей структуре содержат однонаправленные технологические связи только одного типа. Сложные однонаправленные ХТС в своей структуре имеют однонаправленные технологические соединения разного типа.

Встречнонаправленные, или контурные ХТС — это системы, содержащие противонаправленные, обратные и энерготрансформационные технологические связи.

Встречнонаправленные ХТС могут быть простыми и сложными контурными системами. Простые контурные, или одноконтурные, ХТС в своей структуре содержат один простой контур. Простой контур представляет собой замкнутую совокупность элементов ХТС, при обходе которой в направлении технологических потоков никакой элемент, кроме одного начального, дважды не повторяется. Простой i -й контур L_i ХТС можно задать перечислением номеров образующих его элементов: $L+i=\{n_1, n_2, \dots, n_k, \dots, n_l\}$, где $n_l(n_k)$ — номер начального (k -го) элемента контура.

Сложные контурные, или многоконтурные, ХТС могут быть упорядоченными и взаимосвязанными. Упорядоченные многоконтурные ХТС содержат в своей структуре произвольное число упорядоченных расположенных, или строго соподчиненных в определенном направлении одноконтурных подсистем.

Взаимосвязанные многоконтурные ХТС имеют в своей структуре различное число произвольно взаимосвязанных одноконтурных подсистем, содержащих общие элементы, которые принадлежат одновременно нескольким различным подсистемам.

В общем случае технологическая топология сложных ХТС содержит произвольную комбинацию различных однонаправленных и встречно-направленных технологических связей.

Тип технологических связей существенно влияет на значения различных технологических и технико-экономических показателей (ТЭП) эффективности функционирования ХТС, а также на значения показателей свойств ХТС.

Исходя из особенностей принципа функционирования отдельных ХТП и ХТС в целом, который характеризуется на определенном интервале времени законом изменения входных и выходных переменных ХТС, а также составом выпускаемой продукции, выделяют основные классы ХТС:

- непрерывные и периодические;
- ХТС для производства строго определенных продуктов;
- ХТС для производства многоассортиментной продукции.

По способу функционирования ХТС для производства строго определенных продуктов выделяют следующие классы ХТС:

- непрерывные,
- непрерывно—циклические,
- непрерывно—периодические.

Непрерывные ХТС — это такие системы, способ функционирования которых на любом интервале времени характеризуется стационарным непрерывно—произвольным изменением или постоянством переменных состояния каждого отдельного ХТП и ХТС в целом. Непрерывные ХТС позволяют получать большое количество однородного продукта с единицы объема аппаратов, а также сократить непроизводительные потери топливно-энергетических ресурсов и сырья, обеспечивают возможность полной автоматизации всех ХТП. Примерами непрерывных ХТС являются крупнотоннажные ХТС производства карбамида, капролактама, аммиака, серной кислоты, фенола, этилена, хлорметанов и др.

Непрерывно—циклические ХТС — это такие системы, для которых характерно стационарное непрерывно произвольное изменение или постоян-

ство входных переменных и переменных состояния в целом при циклическом изменении во времени как переменных состояний некоторых ХТП, так и технологической топологии ряда подсистем. Примером непрерывно–циклических ХТС являются подсистемы адсорбции сырья или продуктов, регенерации теплоты внутренних ТП системы и др.

Непрерывно–периодические ХТС — такие системы, у которых входные переменные и переменные состояния отдельных ХТП и ХТС в целом, а также технологическая топология системы периодически изменяются во времени. В структуру таких ХТС входят как непрерывные, так и периодические ХТП. Примером непрерывно–периодической является ХТС полимеризации винил–хлорида из суспензии, в такой ХТС реакторный блок работает непрерывно, а технологические блоки демономеризации и сушки поливинилхлорида работают периодически.

В ряде отраслей химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и фармацевтической промышленности широко распространены малотоннажные производства многоассортиментной продукции. Для этих производств характерны изменяющийся ассортимент малотоннажной продукции, множество видов перерабатываемого уникального сырья, а также сложность и неоднозначность маршрутов химического синтеза продуктов, разнообразные тип–конструкции аппаратов многофункционального назначения, преимущественно периодические ХТП, наличие вспомогательных организационно–технических операций (загрузка, выгрузка, очистка аппаратов, пуск, останов и др.).

Наибольшая мобильность присуща ассортименту таких классов химических продуктов, как лакокрасочные материалы, синтетические красители, органические промежуточные продукты, химические реактивы и особо чистые вещества, медикаменты, химические средства защиты растений и т.п.

Периодические ХТС для выпуска многоассортиментной продукции, способ функционирования которых характеризуется периодическим законом изменения во времени входных переменных и переменных состояния

отдельных ХТП и ХТС в целом, подразделяют на следующие классы: индивидуальные, совмещенные и гибкие. В структуру периодических ХТС для согласования во времени режимов работы отдельных периодических ХТП может входить большое число резервуаров, или емкостей.

Индивидуальные ХТС — это такие системы, которые в разные периоды времени в зависимости от видов сырья позволяют выпускать, используя одни и те же элементы при определенных жестких технологических связях между элементами и при заданных режимах функционирования периодических ХТП, один вид продуктов. Обычно в индивидуальных ХТС циклически производят подряд несколько партий одного продукта. Примерами индивидуальных ХТС являются производства эпоксидных смол, красителей и др.

Совмещенные многоассортиментные ХТС (СМ–ХТС) — это многоассортиментные системы, которые в зависимости от видов сырья в различные периоды времени позволяют выпускать, используя одни и те же элементы (аппараты) при определенных жестких технологических связях между этими элементами и заданных режимах работы периодических ХТП, одновременно несколько видов продуктов. Для СМ–ХТС характерны высокие значения коэффициентов использования технологического оборудования и возможность применения крупнотоннажных аппаратов.

Следует, однако, отметить, что СМ–ХТС имеют ряд недостатков, связанных с необходимостью останова оборудования для промывания и очистки при переходе с выпуска одного ассортимента продуктов на другой, с возможностью загрязнения одного продукта другим, с некоторыми потерями продукции при смене ассортимента, с трудностями подбора оптимального ассортимента выпускаемых продуктов, с выбором оборудования из-за различия параметров ХТИ при производстве разных продуктов. Несмотря на это, использование оптимально организованных СМ–ХТС для производства малотоннажных продуктов является несомненно экономически выгодным, в частности для производства химических реактивов, органических красителей и промежуточных продуктов, пестицидов и др.

Гибкие многоассортиментные ХТС (ГМ–ХТС) — это такие многоассортиментные системы, которые в различные периоды времени в зависимости от видов сырья позволяют выпускать, используя определенный набор элементов (что обусловлено изменением состава элементов и периодических ХТП, изменением структуры технологических связей между ними, а также перенастройкой технологических режимов функционирования ХТП), одновременно различные совокупности нескольких видов продуктов. ГМ–ХТС принципиально дают возможность существенно интенсифицировать и повысить ТЭП производств различных малотоннажных продуктов.

Рассмотрим общую характеристику следующих основных свойств ХТС: надежность, безопасность, чувствительность, помехозащищенность, устойчивость, управляемость, эмерджентность и сложность.

Надежность ХТС — это свойство системы выполнять требуемые функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей (производительность, качество продукции, расход материальных ресурсов и т. п.) в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям работы, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования. Надежность как комплексное свойство ХТС в зависимости от целей функционирования и условий ее эксплуатации характеризуется отдельными частными свойствами, которыми являются безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость, либо сочетанием этих частных свойств как для ХТС, так и для образующих ее элементов и подсистем.

Безотказность и ремонтпригодность ХТС как составляющие комплексного свойства надежности с различных сторон характеризуют способность ХТС в течение определенного времени сохранять свою работоспособность.

Работоспособность ХТС — состояние ХТС, при котором она может выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно–технической документацией. В процессе функционирования под влиянием различных внутренних и внешних факторов ХТС может полностью или частично утрачивать свою работо-

способность. Нарушение или утрату работоспособности принято называть отказом. Признаки, или критерии, отказа ХТС (элемента) определяются нормативно–технической документацией. Для количественной оценки надежности используют различные показатели надежности, которые выбирают с учетом особенностей функционирования ХТС, режимов и условий их эксплуатации, а также с учетом последствий отказов.

Обеспечение надежности ХТС — это совокупность научно–методических и организационно–технических мероприятий, направленных на достижение или поддержание заданных показателей надежности ХТС. Высокие экономически оптимальные показатели надежности ХТС можно получить только при достижении оптимальных показателей надежности на стадии проектирования ХТС, при повышении показателей надежности в процессе изготовления оборудования и сооружения ХТС, а также при поддержании оптимальных показателей надежности оборудования в процессе его эксплуатации.

Безопасность ХТС — это свойство системы сохранять такое техническое состояние, при котором предотвращается возможность появления отказов, сопровождаемых разгерметизацией оборудования и утечкой токсичных веществ, а также авариями, приводящими к возникновению пожаров, взрывов, к тяжелым последствиям для жизни человека и окружающей среды. Стихийные бедствия (удар молнии, град, наводнение, землетрясение и т.п.) приводят к катастрофическим авариям ХТС, в результате которых безопасность систем резко снижается.

Например, для крупнотоннажных ХТС производства серной кислоты из серы низкие показатели надежности оборудования и технологических схем приводят не только к ежегодному недовыпуску 15% продукции и к росту затрат на ремонт, но и к уменьшению безопасности этих ХТС в результате разгерметизации оборудования и утечки большого количества токсичных полупродуктов в рабочую зону производственных помещений и в атмосферу.

Снижение безопасности при эксплуатации этих крупнотоннажных ХТС в результате утечек диоксида и триоксида серы приводит к образованию

токсичных веществ в приземном слое выше предельно–допустимых концентраций. Низкие показатели надежности и безопасности этих действующих крупнотоннажных ХТС обуславливают перерасходы сырья, материалов, энергозатрат на 10% и более по сравнению с проектными значениями. Утечка технологических газов в контактном отделении из отверстия с приведенным диаметром 3 мм в течение года вызывает дополнительную потерю 30 т кислоты или 10 т серы, а также наносит значительный ущерб окружающей среде.

Чувствительность ХТС — это свойство систем изменять переменные состояния и величину КЭ их функционирования под влиянием изменений собственных параметров систем (параметров элементов и параметров технологического режима). Создание ХТС, малочувствительных и нечувствительных к изменению их параметров, весьма важно для повышения качества функционирования ХТС.

Изменения (вариации) параметров ХТС — это любые их отклонения от значений, принятых за исходные. Различают три основных вида вариаций параметров ХТС:

- α -вариации параметров, не изменяющие структуру и начальные условия;
- β -вариации параметров, изменяющие начальные условия;
- λ -вариации параметров, изменяющие структуру системы.

В дальнейшем рассматривается анализ чувствительности ХТС к α -вариациям параметров.

Необходимость исследования чувствительности ХТС при их проектировании и эксплуатации обусловлена тем, что при сооружении ХТС значения параметров элементов ХТС, как правило, отличаются от расчетных проектных значений либо вследствие неточности исходных проектных данных, либо вследствие невозможности точной реализации этих параметров в промышленных условиях. Отсюда следует, что информация о чувствительности системы может использоваться для улучшения эффективности ХТС на стадии эксплуатации и, что особенно важно, на стадии проектирования,

так как позволяет выявить параметры ХТС, нуждающиеся в наиболее точном определении. Кроме того, зная оценки чувствительности ХТС, можно рассчитать оптимальные значения коэффициентов запаса для параметров элементов, обеспечивающих требуемое значение КЭ.

Помехозащищенность ХТС — это свойство систем эффективно функционировать в условиях действия внутренних и внешних помех.

К типичным помехам, или случайным возмущениям, относятся, например, изменение активности катализатора, изменение температуры или давления в элементах и т. д. (внутренние помехи); изменение атмосферных условий, массового расхода и состава сырья, нарушение режимов поставки сырья и режимов отгрузки готовой продукции и т.д. (внешние помехи).

При эксплуатации ХТС существует взаимосвязь между помехозащищенностью, надежностью и чувствительностью систем. Наличие помех влияет на показатели надежности и чувствительность ХТС, которые в свою очередь изменяют КЭ системы. При решении задач проектирования и эксплуатации ХТС влияние различных показателей свойств (чувствительность, надежность, помехозащищенность) на КЭ системы учитывают последовательно, создавая отдельно математические модели ХТС для анализа чувствительности, надежности и т. п.

Устойчивость ХТС (как режимно–динамическое изменение состояния под воздействием внешних факторов в теории автоматического управления) — это способность системы сохранять требуемые свойства после малых возмущающих воздействий.

Наличие обратных и противоточных технологических связей в сложных ХТС обуславливает возможность таких явлений в процессе их функционирования, когда после возникновения какого–либо возмущения параметры стационарного режима ХТС не возвращаются к своим прежним значениям при устранении этого возмущения. Кроме того, при эксплуатации ХТС из–за наличия возмущений может возникнуть такая ситуация, что найденные при проектировании ХТС оптимальные параметры стационарного режима не будут сохраняться после устранения возмущений, и, следовательно, ука-

занный режим нельзя будет реализовать, не используя специальные АСУТП.

Каждому стационарному режиму ХТС соответствует набор определенных значений оценок свойств системы в нормальных условиях, т. е. в отсутствие возмущений. Следует отметить, что нормальные условия функционирования ХТС, строго говоря, являются своеобразной идеализацией. Поскольку в действительности условия функционирования сложных ХТС в той или другой мере отличаются от нормальных, существенно знать, сохраняются ли требуемые свойства системы после возникновения и устранения возмущений.

Чтобы конкретизировать понятие устойчивости ХТС (как свойства режимно–динамического изменения состояния системы под воздействием внешних факторов в теории автоматического управления, точнее в теории устойчивости движения), необходимо определить класс допустимых возмущений (бесконечно малые или конечные, детерминированные или стохастические возмущения), описать рассматриваемое свойство ХТС, а также установить, какой смысл придается словам «сохранение требуемого свойства». Строго говоря, понятие устойчивости относится не к системе как таковой, а к какому–либо свойству ее функционирования. Так, система может быть устойчива к некоторым возмущениям в отношении одного свойства и неустойчива в отношении другого свойства. Точно так же может наблюдаться устойчивость ХТС по отношению к одним возмущениям и неустойчивость по отношению к другим возмущениям в смысле одного свойства.

В последние годы, исходя из концепций и целей устойчивого развития (см. раздел 2.1), широко используется новое современное понятие «устойчивое химическое производство» («устойчивая ХТС» или устойчивое предприятие НГХК), которое представляет собой энергоресурсосберегающее экологически безопасное и имеющее социально–ориентированную цель развития химическое производство или ХТС.

В связи с этим современное понятие «устойчивая ХТС» с позиций устойчивого развития человечества и достижения ЦУР принципиально от-

личается от понятия устойчивая ХТС, как система, имеющая свойство находиться в определенном режимно–динамическом состоянии под воздействием внешних факторов с позиций направления классической теории автоматического управления, развиваемого в работах И.А. Вышнеградского, академика А.М. Ляпунова, Н. Nyquist.

2.3. Понятия малоотходных и энергоресурсосберегающих химико–технологических систем

Энергоресурсосбережение позволяет не только сберечь природные и материальные ресурсы для будущих поколений, растянуть на значительно более длительные сроки их рациональное использование и обеспечить охрану окружающей среды, но также открывает широчайшие возможности для увеличения объема выпуска высококачественной продукции при тех же или даже меньших затратах общественного труда и экономии капитальных вложений.

Важным показателем эффективности ХТС и уровня энергоресурсосбережения в НГХК является материалоемкость продукции. Материалоемкость продукции — это удельный расход всех видов материальных ресурсов, необходимых для изготовления единицы какой–либо продукции, который выражается либо в натуральных показателях, либо в процентах стоимости использованных сырья и ТЭР в себестоимости продукции. Снижение материалоемкости химической продукции позволяет повысить уровень ресурсосбережения в промышленности.

Одним из важных направлений энергоресурсосбережения в химической промышленности является энергосбережение. Энергосбережение достигается в результате реализации в промышленности:

- научно обоснованных оптимальных удельных норм расхода топлива, тепловой и электрической энергии для производства различных видов химической продукции, способов ликвидации потерь ТЭР;

- способов утилизации вторичных энергоресурсов; способов комбинированной выработки энергии (технологического пара и электроэнергии) в ХП;
- организационно–хозяйственных мероприятий по рациональному расходованию всех видов ТЭР на предприятиях;
- в результате применения современных термодинамических принципов и методов синтеза высокоэффективных химико–энерготехнологических систем, а также прогрессивного производственного опыта.

Энергоресурсосбережение представляет собой одну из главных концепций безотходной технологии.

Безотходная технология — это идеальный способ промышленного производства разнообразных видов продукции, обеспечивающий сбережение и наиболее рациональное использование всех компонентов природных ресурсов, практически полностью исключая образование отходов и не наносящий ущерба окружающей среде. Безотходная технология позволяет создавать принципиально новые антропогенные безопасные для окружающей среды глобальные ресурсные циклы, которые включают взаимосвязанную совокупность различных перемещений природных веществ, используемых человеком на различных этапах развития общества.

Основным структурным компонентом безотходной технологии как идеального способа промышленного производства продукции является безотходное промышленное производство. Безотходное промышленное производство — это идеальный полностью безопасный для окружающей среды взаимосвязанный комплекс разнообразных производств различных видов продуктов, практически исключая образование отходов. В структуру безотходного промышленного производства, как правило, входят различные безотходные, малоотходные и ресурсосберегающие ХТС.

Безотходная ХТС – это идеальная полностью безопасная для окружающей среды ХТС производства основных и побочных химических продуктов, полностью исключая образование неперерабатываемых и вредных отходов.

Малоотходная ХТС — это ХТС производства одного или нескольких химических продуктов, обеспечивающая образование минимального количества выбросов, отходов, не оказывающих вредного воздействия на окружающую среду.

Энергоресурсосберегающая экологически безопасная социально–ориентированная ХТС, т. е. в новом понимании «устойчивая ХТС» (см. раздел 2.2) — это ХТС, не оказывающая вредного воздействия на окружающую среду и обеспечивающая минимальную материалоемкость выпускаемых продуктов заданного количества и требуемого качества, а также имеющая социально–ориентированную направленность развития.

Нами рассматриваются энергоресурсосберегающие ХТС, которые в антропогенных экологически безопасных глобальных ресурсных циклах относятся только к этапу химической переработки материальных ресурсов в продукты, не включающему переработку отходов и разнообразные способы утилизации этих продуктов либо после их использования по прямому назначению, либо после их морального и физического старения. Ресурсосберегающие экологически безопасные ХТС представляют собой сложные многоконтурные ХТС, в структуру которых входят высокоэффективные ХТП и высокоинтенсивные аппараты химической технологии. Важнейшим классом ресурсосберегающих и малоотходных ХТС являются химико–энерготехнологические системы.

Химико–энерготехнологические системы (ХЭТС) — это такие ХТС, в которых различные ХТП, осуществляющие химические и физические преобразования веществ с выделением и поглощением большого количества теплоты, тесно взаимодействуют с определенными теплотехническими и теплоэнергетическими процессами, что обеспечивает требуемый выпуск высококачественной химической продукции с желаемыми технологическими показателями, а также эффективное использование разнообразных ТЭР и охрану окружающей среды от загрязнений.

В структуру ХЭТС входит наряду с высокоэффективными аппаратами и машинами химической технологии разнообразное специальное теплотех-

ническое и энергетическое оборудование: парогенераторы, котлы–утилизаторы, экономайзеры, турбогенераторы, газовые и паровые турбины, печи, абсорбционно–холодильные установки, тепловые насосы и т.п. Примерами являются крупнотоннажные ХЭТС производства аммиака, слабой азотной кислоты, метанола, фталевого и малеинового ангидридов и др.

Экономические и технологические критерии эффективности ресурсосберегающих экологически безопасных химико–технологических систем

В качестве критериев эффективности ресурсосберегающих ХТС используют как различные экономические показатели (ТЭП), например прибыль, себестоимость, приведенные затраты и др., так и технологические показатели (например, производительность и мощность по выпуску продукции, термодинамический, эксергетический коэффициенты полезного действия (кпд), степени разделения, коэффициенты тепло– и массопередачи, степень превращения, удельные расходные нормы сырья и ТЭР и др.)

Кратко рассмотрим характеристику экономических КЭ. Для согласования разнообразных тенденций в процессе функционирования ресурсосберегающих ХТС часто используют КЭ с ограничительными условиями. Например, такого рода экономическими КЭ для ресурсосберегающих ХТС могут служить:

1. производительность при ограничении на требуемое качество и заданную себестоимость продуктов;
2. средняя себестоимость продукции при ограничении на заданную производительность и требуемое качество и т. п.

Необходимо отметить, что КЭ, содержащие ограничительные условия, имеют ряд недостатков, которые весьма сужают область их использования.

Для наиболее полной оценки эффективности функционирования ХТС, как правило, необходимо использовать обобщенные экономические КЭ, к которым относятся чистая продукция и приведенные затраты. Чистая продукция D_c равна:

$$D_c = \sum_i B_i C_i - (M_3 + \mathcal{E}_3 + A), \quad (2.3.1)$$

где V_i — объем товарной продукции, т; C_i — оптовая цена, руб/т, $M_3(\mathcal{E}_3)$ — стоимость материальных затрат (затрат на ТЭР), руб.; A — амортизационные отчисления, руб; i — вид продукции.

Величина приведенных затрат Π_3 равна:

$$\Pi_3 = Z_3 + EK_3 \quad (2.3.2)$$

где Z_3 — суммарные эксплуатационные затраты, руб/год; E — нормальный коэффициент экономической эффективности капиталовложений (величина, обратная нормативному сроку окупаемости), год; K_3 — капитальные затраты, руб.

В настоящее время наиболее широко в качестве критерия экономической эффективности ХТС используется показатель «чистый приведённый доход» (**Net Present Value, NPV**) или «чистая приведенная стоимость».

При исследовании и проектировании ресурсосберегающих экологически безопасных ХТС в зависимости от поставленных целей необходимо использовать как экономические, так и технологические КЭ. Правильно выбранные технологические КЭ не должны противоречить экономическим КЭ, поскольку в этом случае они являются их частными аналогами.

При проектировании оптимальных ресурсосберегающих экологически безопасных ХТС использование технологических КЭ позволяет исключить из рассмотрения большую часть нерациональных альтернативных вариантов проектируемой ХТС, которые весьма отличаются от оптимального. Как правило, технологические КЭ дают возможность найти рациональный вариант на самых низких иерархических уровнях ХТС и тем самым значительно сократить число альтернативных вариантов, которые участвуют в принятии решений на более высоких уровнях иерархии. Так, при выборе типа аппаратного оформления ступени контакта для массообменного аппарата при прочих равных условиях отдадут предпочтение типу ступени контакта с большим коэффициентом массопередачи, который в этом случае представляет собой технологический КЭ элемента ХТС. При заданном числе теоретических ступеней контакта в ректификационной колонне место ввода питания выбирают так, чтобы обеспечить наилучшее качество

продуктов разделения, которое в этом случае также играет роль технологического КЭ.

С середины 1980–х годов значительные энергетические нагрузки крупнотоннажных ХЭТС и появление в их структуре специального теплотехнического и энергетического оборудования требуют при оценке эффективности ХЭТС учета не только количественных, но и качественных характеристик работоспособности потоков энергии в системе, которая оценивается величиной эксергии. Эта задача решается с позиций эксергетического анализа на основе использования как 1–го, так и 2–го законов термодинамики. Совмещение технико–экономического анализа с эксергетическим анализом эффективности ХЭТС привело к появлению новых термоэкономических КЭ, которые позволяют экономически оценить эффективность преобразования потоков эксергии в ХТС, а также термодинамическую степень совершенства процессов функционирования ХТС и ее отдельных элементов.

Качество функционирования каждого элемента или подсистемы некоторого иерархического уровня СХТС характеризуют определенным видом технологических КЭ. Технологическими КЭ отдельных элементов ХТС или ХТП являются значения разнообразных кпд, значения интенсивности и производительности этих ХТП. Кпд показывают степень приближения ХТП к равновесию. Примерами кпд ХТП являются:

- для реакторных процессов — степень превращения исходных реагентов, выход продукта, селективность;
- для массообменных процессов — степень разделения, степень поглощения, степень извлечения целевого продукта;
- для теплообменных процессов — тепловой кпд и эксергетический кпд.

Технологическими КЭ функционирования МХТС и СХТС в целом являются удельные расходные нормы по сырью и ТЭР. Для оценки эффективности функционирования ХТС и СХТС используют также экономические КЭ — производительность, рентабельность, ликвидность, себестоимость продукции и приведенные затраты, материалоемкость продукции.

2.4. Краткая характеристика способов и приемов энергоресурсосбережения в химико–технологических системах

Разработка научно обоснованных решений по организации энергоресурсосберегающих экологически безопасных ХТС методологически базируется на применении следующих основных физико–химических и технологических способов энергоресурсосбережения в химических отраслях промышленности:

- способа наилучшего использования движущей силы (ДС) химико–технологических процессов,
- способа наиболее полной переработки сырья,
- способа рационального использования топливно–энергетических ресурсов (ТЭР),
- способа наилучшего функционально–структурного использования аппаратов и машин,
- способа замкнутого водоснабжения,
- способа обеспечения и повышения надежности производства,
- способа рациональной пространственной компоновки производства.

Для осуществления любого ХТП переработки сырья необходимо наличие ДС процесса, представляющей собой первоисточник всех химических и физико–химических преобразований вещества и энергии. Величина ДС влияет на скорость ХТП. В общем случае формула для расчета скорости любого ХТП имеет следующий вид:

$$U = c \frac{E}{R}$$

где U — скорость ХТП; c — константа скорости; E — движущая сила; R — сопротивление процесса.

Скорость ХТП определяет производительность аппаратов, их число в технологической схеме ХТС. Интенсивность работы аппарата ХТС равна удельной производительности аппарата на единицу объема или площади его сечения. В технологические схемы ресурсосберегающих ХТС (РХТС)

должны входить высокоинтенсивные ХТП и аппараты химической технологии. Интенсификация работы аппаратов достигается в результате повышения эффективности ХТИ и улучшения их инженерно–аппаратурного оформления, т.е. улучшения конструкций аппаратов.

Способ наилучшего использования ДС химико–технологических процессов является основополагающим способом ресурсосбережения, так как только этот способ принципиально позволяет значительно повышать степень переработки материальных ресурсов, резко снижать потери сырья, топлива и энергии, а также существенно сокращать затраты конструкционных материалов при производстве химической продукции. Все другие способы ресурсосбережения в химической индустрии, в частности, способы наиболее полной переработки сырья и рационального использования ТЭР, направлены на всестороннее обеспечение и реализацию основополагающего способа — способа наилучшего использования движущей силы ХТС.

Для практической реализации различных способов ресурсосбережения в химической индустрии применяют разнообразные режимно–параметрические, технологические, аппаратурно–конструкционные и организационно–технические приемы и операции.

Кратко рассмотрим общую характеристику основных приемов, операций и средств, направленных на обеспечение ресурсосбережения в химической индустрии. Важнейшими режимно–параметрическими приемами и операциями ресурсосбережения являются:

- оптимизация значений концентраций реагирующих веществ;
- оптимизация значений параметров технологических режимов ХТП — температуры и давления;
- смещение состояния равновесия обратимых ХТП в желаемом направлении;
- изменение механизма химических превращений; использование одного из реагентов в избытке;
- применение высокоактивных и селективных катализаторов;

- изменение скорости движения фаз перерабатываемых веществ;
- увеличение поверхности соприкосновения перерабатываемых веществ;
- изменение направления движения потоков взаимодействующих веществ,
- ввод дополнительных веществ–инициаторов, промежуточных теплоносителей, поверхностно–активных веществ, растворителей, разделяющих агентов; изменение числа фаз перерабатываемых веществ (ввод инертных газов или твердых тел, изменение агрегатного состояния одного из перерабатываемых веществ путем конденсации или испарения, кристаллизации одного из продуктов реакции).

Основными технологическими приемами и операциями ресурсосбережения являются:

- совмещение различных процессов химической технологии в одном аппарате (различных химических процессов, химических и массообменных, химических и теплообменных процессов);
- дискретно–периодическая подача потоков перерабатываемых веществ в аппарат (периодическая подача потоков веществ, наложение внешних пульсаций на фазы и потоки веществ, использование турбулентных пульсаций);
- создание внешних энергетических воздействий на ХТП (электрических и магнитных полей, радиационного и лазерного излучений);
- применение внешних перемешивающих устройств; регенерация и рекуперация вторичных материальных ресурсов; создание рациональных технологических связей между аппаратами ХТС (байпасные, параллельные и обратные технологические потоки вещества и энергии);
- исключение промежуточных технологических стадий и операций;
- согласование режимов функционирования ХТП.

К важнейшим аппаратурно–конструкционным приемам и операциям ресурсосбережения относятся:

- создание рациональных конструкций аппаратов (выбор геометрической формы узлов и деталей аппарата, в частности, единиц массопереноса; выбор материала конструкций);
- определение оптимальных размеров аппарата; изменение схем движения перерабатываемых веществ;
- создание многократного воздействия на фазы перерабатываемых веществ (продольное и поперечное секционирование, распределение фаз по высоте аппарата, многократная конверсия фаз и др.);
- использование энергии контактирующих фаз (турбулизация и соударение потоков, закручивание фаз, транспортирование одной фазы другой фазой, взаимное эжектирование и др.);
- совмещение отдельных узлов и аппаратов (комбинирование однотипных аппаратов и узлов, агрегирование функций аппаратов и узлов);
- модульное конструирование многофункциональных аппаратов.

Основными организационно–техническими приемами ресурсосбережения в химической индустрии являются:

- обогащение и выбор наилучших видов природного сырья;
- комплексная переработка минерального сырья;
- комбинирование ХТП;
- комбинирование ХТС.

Необходимо отметить, что большинство режимно–параметрических, технологических и аппаратурно–конструкционных приемов ресурсосбережения диалектически взаимосвязаны. Использование одного из режимно–параметрических или технологических приемов, как правило, всегда связано с изменениями инженерно–аппаратурного оформления ХТП, которые объективно требуют использования какого–либо аппаратурно–конструкционного приема или средства ресурсосбережения. Применение одного и того же режимно–параметрического, технологического и аппаратурно–конструкционного приема может обеспечивать одновременную реализацию различных способов ресурсосбережения для одного ХТИ или для ХТС в целом.

В связи с этим для получения научно обоснованных семантических решений при синтезе РХТС на основе рационального использования разнообразных способов, приемов и операций ресурсосбережения в химической промышленности необходимо широко использовать принципы теории синтеза ХТС, методы математического моделирования и оптимизации ХТИ, теорию анализа и оптимизации ХТС.

Кратко изложим сущность физико–химических и технологических способов ресурсосбережения в ХТС. Способ увеличения ДС химических процессов реализуется при помощи следующих режимно–параметрических приемов и операций:

1. увеличение концентрации взаимодействующих компонентов в сырье;
2. увеличение давления;
3. отвод продуктов реакции из реакционного объема;
4. смещение равновесия при изменении температуры и давления.

Способ наиболее полной переработки сырья в РХТС практически реализуют с использованием следующих режимно–параметрических, технологических и аппаратурно–конструкционных приемов:

- избыток реагента по отношению к теоретически необходимому количеству; организация противотока перерабатываемых веществ;
- смещение равновесия при обратимых реакциях;
- воздействие на нежелательные побочные реакции;
- стабилизация наиболее рационального (оптимального) состояния проведения ХТП;
- организация последовательно–обводных, или байпасных и обратных, или рециклических технологических потоков в ХТС;
- регенерация вспомогательных исходных веществ;
- рекуперация побочных продуктов и отходов;
- создание совмещенных ХТП;
- введение дополнительного вещества;
- многократное воздействие на фазы перерабатываемых веществ.

Основными режимно–параметрическими приемами и операциями, реализующими способ наилучшего использования ТЭР в РХТС, являются:

- выбор оптимального вида сырья;
- применение высокоэффективных катализаторов;
- выбор направления относительного движения теплообменивающихся потоков;
- оптимизация температурных режимов для проведения ХТП и др.

Для реализации способа наилучшего использования ТЭР наиболее широко применяют следующие технологические приемы и операции:

- регенерацию и рекуперацию теплоты;
- многократное использование теплоты;
- совмещение тепловых, химических и массообменных процессов;
- применение рациональных ХТП выделения готовых продуктов;
- наиболее полную утилизацию вторичных энергоресурсов (ВЭР);
- использование атомной энергии;
- использование нетрадиционных источников энергии.

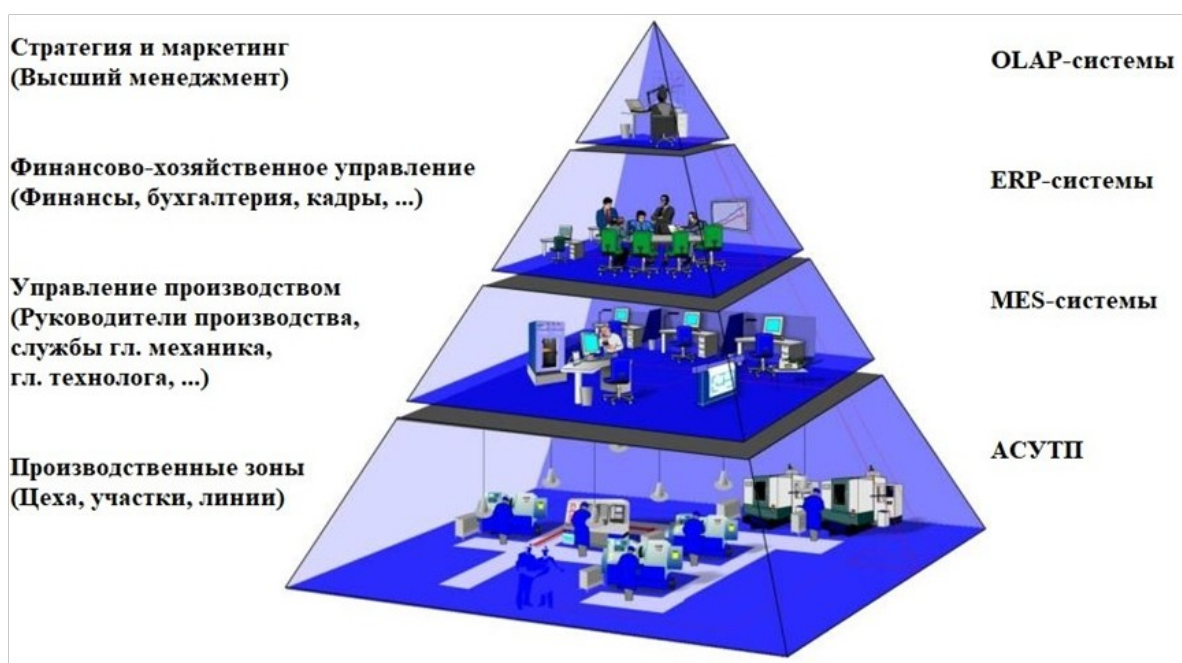


Рисунок 2.4.1. Иерархия информационных систем управления предприятиями НГХК

Важнейшим инженерно–конструкционным способом обеспечения энергоресурсосбережения в ХТС является способ оптимальной компоновки оборудования, включающей операции размещения оборудования и операции трассировки трубопроводов производства. Выбор оптимальной компоновки оборудования позволяет снизить удельные расходы ТЭР и конструкционных материалов производства. Одним из важных путей ресурсосбережения в ХТС является стабилизация параметров оптимальных технологических режимов производства, которую обеспечивают иерархические распределенные АСУТП и АСУП химической промышленности. Иерархическая структура автоматизированных систем управления современных предприятий НГХК представлена на рис. 2.4.1.

Классификация способов энергоресурсосбережения на различных иерархических уровнях предприятий (от микроуровня (молекулярного) до мета– и мегауровня) НГХК представлена на рисунке 2.4.2.



Рисунок 2.4.2. Классификация способов энергоресурсосбережения на различных иерархических уровнях предприятия.

При разработке научных обоснований способов и приемов энергоресурсосбережения в ХТС и методов интенсификации ХТП необходимо широко использовать принципы «зелёной» химии. Зелёная химия (англ. **green chemistry**) – научное направление в химии, к которому можно отнести любое

усовершенствование химических процессов, которое положительно влияет на обеспечение охраны окружающей среды и рациональное использование

Зелёная химия – это научное направление, позволяющее не просто синтезировать необходимое вещество, но получить его таким способом, который, в идеале, не вредит окружающей среде на всех стадиях своего синтеза.

Последовательное использование принципов **Зеленой химии** при инженерии энергоресурсосберегающих ХТС приводит к снижению затрат на производство, так как не требуется вводить в ХТС стадии уничтожения и переработки вредных побочных продуктов, использованных растворителей и других отходов. Сокращение числа стадий в ХТС ведет к экономии энергии, что тоже положительно сказывается на экоэффективности и экономической эффективности ХТС.

В 1998 году П.Т. Анастас и Дж. С. Уорнер в книге «Зелёная химия: теория и практика» сформулировали двенадцать принципов «Зелёной химии», которыми следует руководствоваться исследователям при инженерии энергоресурсосберегающих ХТП и ХТС:

1. Лучше предотвратить потери, чем перерабатывать и чистить остатки.
2. Методы синтеза надо выбирать таким образом, чтобы все материалы, использованные в процессе, были максимально переведены в конечный продукт.
3. Методы синтеза, по возможности, следует выбирать так, чтобы используемые и синтезируемые вещества были как можно менее вредными для человека и окружающей среды.
4. Создавая новые химические продукты, надо стараться сохранить эффективность работы, достигнутую ранее, при этом токсичность должна уменьшаться.
5. Вспомогательные вещества при производстве, такие, как растворители или разделяющие агенты, лучше не использовать совсем, а если это невозможно, их использование должно быть безвредным.

6. Обязательно следует учитывать энергетические затраты и их влияние на окружающую среду и стоимость продукта. Синтез по возможности надо проводить при температуре, близкой к температуре окружающей среды, и при атмосферном давлении.
7. Исходные и расходные материалы должны быть возобновляемыми во всех случаях, когда это технически и экономически выгодно.
8. Необходимо избегать получения промежуточных продуктов (блокирующих групп, присоединение и снятие защиты и т. д.).
9. Следует всегда отдавать предпочтение каталитическим процессам (по возможности наиболее селективным).
10. Химический продукт должен быть таким, чтобы после его использования он не оставался в окружающей среде, а разлагался на безопасные продукты.
11. Необходимо развивать аналитические экспресс-методы химической диагностики, чтобы можно было следить в реальном времени за образованием опасных продуктов.
12. Вещества и формы веществ, используемые в химических процессах, нужно выбирать таким образом, чтобы риск химической опасности, включая утечки, взрывы и пожары, были минимальными.

2.5. Основные концепции логистики ресурсоэнергосбережения

Предприятия нефтегазохимического комплекса как специальный класс объектов промышленной логистики

В настоящее время наибольший успех научно-практических разработок по логистике и управлению цепями поставок достигнут в Великобритании, Германии, Франции, США, Италии, Японии и Китае. В России использование методов логистики активно расширяется. Основная причина интереса к логистике во всех индустриально развитых государствах мира состоит в том, что при достижении объективных технических и технологических ограничений экономического роста эффективности производства продук-

ции для дальнейшего интенсивного развития экономики и повышения эффективности предпринимательства в условиях рынка покупателя организации должны использовать принципиально новые методы, способы и средства логистики для увеличения эффективности и надежности обслуживания покупателей на рынке.

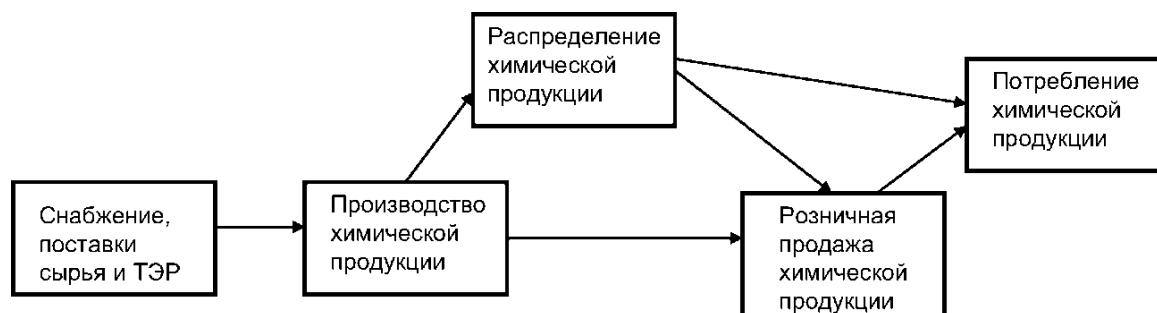


Рисунок 2.5.1. Упрощенная блок-схема традиционной цепи поставок химического предприятия.

Объектами промышленной логистики являются: производства, предприятия различных отраслей и цепи поставок промышленных предприятий (рис. 2.5.1).

Химические, нефтеперерабатывающие, нефтехимические и газоперерабатывающие предприятия, или предприятия НГХК, как объекты исследования промышленной логистики представляют собой совокупность различного уровня сложности и способов функционирования ХТС и ХЭТС. Расчет и оптимизация технологических режимов отдельных ХТП и аппаратов без учета их взаимосвязей с остальными ХТП и аппаратами, входящими в ХТС данного производства, могут привести к неоптимальным значениям параметров технологических режимов и показателей эффективности функционирования всего производства, т.е. ХТС в целом.

В условиях рыночной конкуренции изменились показатели эффективности и конкурентоспособности функционирования предприятий НГХК и цепей поставок предприятий как объектов промышленной логистики.

В настоящее время для оценки экономической эффективности и конкурентоспособности предприятий и ЦП все шире используются инновационные показатели:

- объем товарно–материальных запасов (ТМЗ),
- ресурсоэнергоёмкость продукции,
- гибкость производства,
- качество продукции,
- показатели надежности и безопасности производства,
- показатели воздействия производства на окружающую природную среду (ОПС),
- показатели защиты ОПС от загрязнений,
- длительность производственного цикла.

Совокупность традиционных и инновационных показателей эффективности позволяет комплексно оценивать экономическую эффективность предпринимательской деятельности предприятий НГХК в условиях рынка и необходимости обеспечения устойчивого социально–экономического развития.

Предприятия и ЦП продукции НГХК как объекты промышленной логистики специального класса характеризуются следующими особенностями:

- быстрое изменение широкого ассортимента новых высококачественных материалов и веществ в соответствии с требованиями покупателей;
- сложность оптимального календарного и оперативного планирования выпуска многоассортиментной продукции при изменении видов сырья и покупательского спроса;
- сложность оптимальной организации процессов упаковки, складирования и транспортирования продукции;
- комплексная оптимизация операций разработки, производства, продажи и использования продукции;
- необходимость оптимизации ТМЗ сырья, полупродуктов и ТЭР при обеспечении требуемого объема выпуска целевых продуктов;
- необходимость предотвращения образования в ХТП и ХТС источников отходов и выбросов, оказывающих вредное воздействие на ОПС;

- необходимость обеспечения надежности и безопасности ХТП, аппаратов и машин производств НГХК и ЦП продукции для предотвращения аварий и снижения уровня химического риска;
- необходимость обеспечения ресурсоэнергосбережения на всех стадиях производства и во всех звеньях ЦП предприятий с целью сокращения удельных расходов сырья и ТЭР, а также выполнения требований защиты ОПС от загрязнений при выпуске высококачественной продукции.

В настоящее время для количественной оценки результативности, ресурсоэнергоэффективности, экологической эффективности и конкурентоспособности предприятий НГХК и цепей поставок продукции в целом необходимо использовать «сбалансированную систему показателей» (ССП¹⁹), систему «ключевых индексов производительности», или «ключевых показателей эффективности»²⁰, и систему «прогрессивных индексов устойчивого развития»²¹ с учетом обязательного выполнения требований Международных стандартов ISO–9000, ISO–14000, ISO–19000 и OHSAS–18000, а также положений программы «Ответственная забота» и европейского REACH–законодательства.

Основные концепции, цели и задачи логистики ресурсоэнергосбережения

Законы сохранения массы и энергии — основные законы природы, используемые инженерами при разработке и эксплуатации промышленных предприятий, технологических процессов и оборудования, а также при управлении предприятиями. Однако результат обращения с природными ресурсами с использованием этих законов имеет последствия для состояния глобальной экосистемы, для ОПС. Технические и технологические разработки, обеспечивающие устойчивое развитие, позволяют удовлетворять потребности человечества, не подвергая риску способности будущих поколений удовлетворять свои потребности в природных ресурсах.

¹⁹ англ. Balanced Scorecard, BSC

²⁰ англ. Key Performance Indicator, KPI

²¹ англ. Progressive Sustainable Development Indices, PSDI

Предприятия НГХК, в том числе транснациональные корпорации BP, BASF, Dow Chemical, Dupont, Bayer, Shell, Eni и др. совершили значительный прогресс за последнее десятилетие XX столетия, особенно в улучшении характеристик и показателей эффективности производства, а также показателей охраны ОПС. Однако движение по направлению к обеспечению устойчивого социально-экономического развития мирового сообщества требует от инженеров-химиков также проверять и улучшать другие аспекты организационно-экономической деятельности, которым обычно, к сожалению, не уделялось должного внимания, в особенности инженерами-практиками.

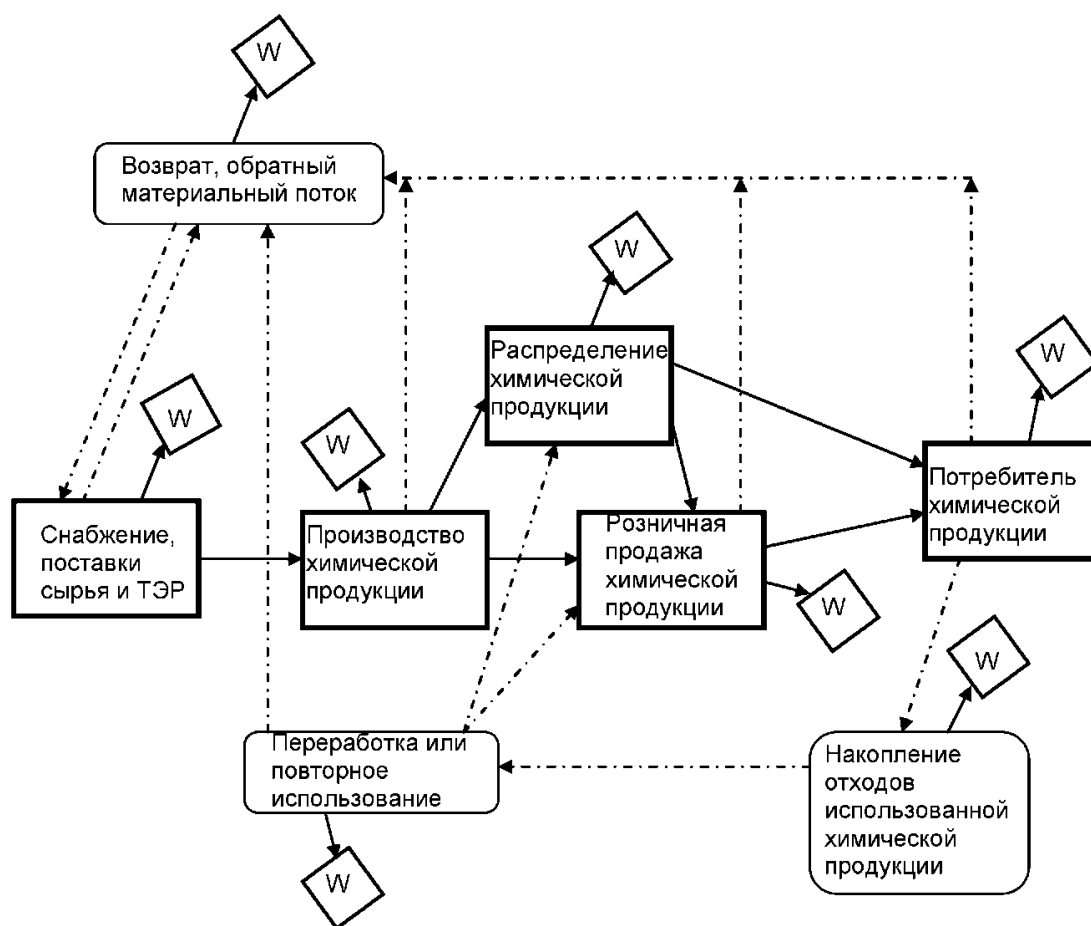


Рисунок 2.5.2. Обобщенная блок-схема организационно-функциональной структуры энергоресурсосберегающей экологически безопасной цепи поставок, или «зеленой» цепи поставок предприятий НГХК (Символом «W» на схеме обозначены отходы (от англ. «Waste»)).

Энергоресурсосберегающие экологически безопасные ХТС и «зелёные» цепи поставок являются объективным организационно–экономическим фактором устойчивого развития, интенсификации технологий и обеспечения конкурентоспособности предприятий НГХК. Для практической реализации концепции устойчивого развития особую важность приобретает решение задач эколого–экономического анализа и оптимизации воздействия промышленных предприятий на ОПС. «Зелёная» ЦП (рис. 2.5.2) — это замкнутая система с обратной связью, которая представляет собой совокупность «прямой» ЦП, обеспечивающей движение и преобразование прямого материалопотока («сырьё» — «готовый конечный продукт», рис. 2.5.1), и «обратной» ЦП, обеспечивающей движение и преобразование обратного отходопотока (рис. 2.5.3).

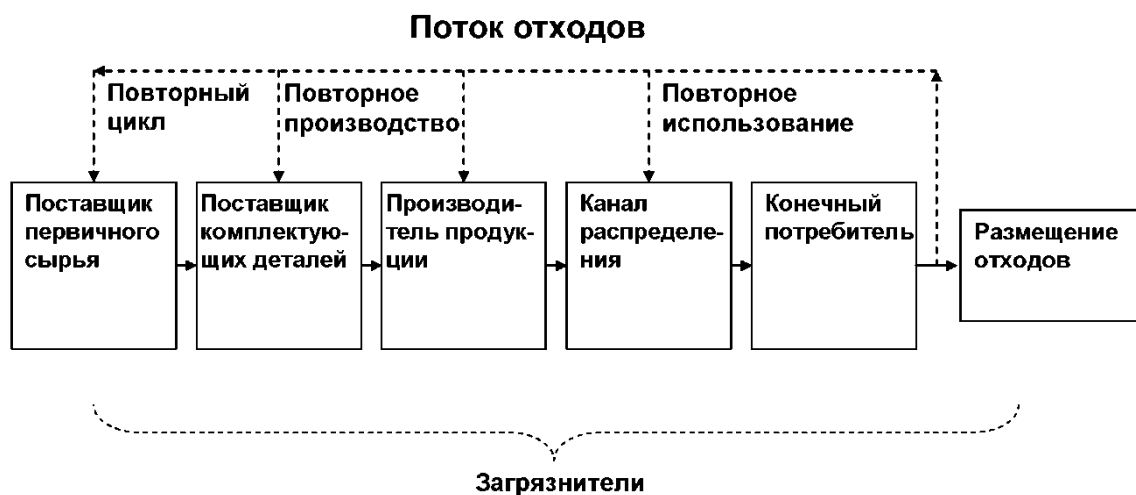


Рисунок 2.5.3. Упрощенная блок–схема обратной цепи поставок, обеспечивающей перемещение и преобразование потока отходов (отходопотока) за счёт операций повторного использования, повторного производства и повторного цикла переработки отходов.

В начале XXI века важнейшим фактором реализации перехода к устойчивому развитию является создание и эксплуатация высокоэффективных энергоресурсосберегающих экологически чистых технологий НГХК, которые обеспечивают:

- производство высококачественной экологически безопасной продукции с оптимальной удельной материалоемкостью и энергоемкостью;

- дальнейшее совершенствование существующих промышленных технологий;
- быстрая разработка и реализация инновационных ресурсоэнергосберегающих технологий.

В настоящее время развивается новое научное направление в промышленной логистике — **логистика ресурсоэнергосбережения**. Важнейшими направлениями логистики ресурсоэнергосбережения являются создание и применение:

- методов организации и управления проектированием инновационной продукции с оптимальной удельной ресурсоэнергоемкостью;
- методов организации и управления разработкой ресурсоэнергосберегающих производственных технологий и производств для выпуска инновационной высококачественной продукции;
- организационно–управленческих методов, способов и средств снижения материало–, ресурсо– и энергоемкости продукции в промышленности и в сфере услуг во всех звеньях цепей поставок «материально–техническое обеспечение–производство–распределение продукции»;
- методов разработки экономически эффективной организационно–функциональной структуры (ОФС) ресурсоэнергосберегающих экологически безопасных, или «зелёных», цепей поставок предприятий НГХК, на основе глубокого изучения физико–химической сущности всех ХТП и использования концепций логистики;
- методов минимизации ТМЗ и методов разработки «стройных» промышленных производств и ЦП;
- методов оптимального планирования и управления потребностями в материалах, сырье и ТЭР при производстве продукции;
- методов организации проектирования и управления оптимальными системами водопотребления на производстве, методов минимизации сточных вод и организации замкнутого водооборота на предприятиях;

- разработка методологии организации переработки и управления движением обратных потоков отходов (отходопотоков), образующихся во всех звеньях «прямой» ЦП, и разработка ОФС «обратной» ЦП;
- методов оптимального управления технологическими, экологическими и предпринимательскими рисками при проектировании и эксплуатации ЦП высококачественной продукции;
- методов всеобщего управления качеством всех ХТП и бизнес-процессов, а также всех материалопотоков и отходопотоков во всех звеньях ЦП и всех видов продукции (изделий и услуг);
- методов интегрированного экономико-экологического управления предприятиями ЦП и методов компьютерной оценки воздействия на ОПС как отдельных предприятий НГХК, так и цепей поставок в целом;
- методов стратегического и оперативно-тактического управления корпоративным сотрудничеством между всеми предприятиями, входящими в ЦП, на основе концепции «долевого разделения прибыли» (концепции «WIN-WIN» — «Моя прибыль — Твоя прибыль») для обеспечения устойчивого развития и конкурентоспособности ЦП в целом.

При решении научно-практических задач логистики ресурсоэнергосбережения необходимо широко использовать современные информационные «CALS»-технологии²² управления всеми этапами жизненного цикла (ЖЦ) инновационных продуктов и технологических установок, а также для решения задач организации и управления действующими производствами инструментальные программные комплексы, реализующие стандарты планирования потребности в материалах (MRP), планирования производственных ресурсов (MRP-II), планирования ресурсов предприятий (ERP) и планирования потребностей распределения (DRP); для проектирования оптимальных технологических схем ХТС — инструментальные программные комплексы «CALS»-технологий (технологий автоматизированной под-

22 Continuous Acquisition and Lifecycle Support (Автоматизированные системы сбора данных и поддержки жизненного цикла продукта)

держки логистики, или автоматизированного накопления информации на всех этапах ЖЦ продукции), «CASE»–технологий²³ и «CAPE»–технологий.

2.6. Организационно–функциональная структура цепей поставок химической продукции

Предприятия НГХК производят разнообразную химическую продукцию (ХП): либо химические вещества и химические реактивы, либо химические материалы, например, горюче–смазочные материалы, лакокрасочные материалы, пластмассы и др. Можно выделить два класса цепей поставок ХП предприятий НГХК: ЦП производимой ХП на предприятии–изготовителе и ЦП применяемой ХП на предприятии–потребителе, которое использует (применяет) эту ХП для производства некоторого готового конечного продукта.

Цепь поставок применяемой ХП, которая выпускается некоторым предприятием НГХК — это линейно упорядоченная взаимосвязанная совокупность юридических лиц, технических и транспортных средств, технологического оборудования, производственных сооружений и специальных информационно–коммуникационных устройств, которые обеспечивают движение и преобразование материальных потоков этой ХП при материально–техническом снабжении, транспортировании, хранении ТМЗ, использовании по назначению в производстве некоторого конечного продукта требуемого качества, переработке и захоронении (удалении) отходов от производственного применения по назначению этой химической продукции.

Основным начальным этапом организационно–функционального проектирования оптимальной структуры ЦП предприятий–производителей и предприятий–потребителей некоторой ХП является разработка рациональной схемы химического способа производства данной ХП, которая отображает взаимосвязь химических реакций, позволяющих синтезировать молекулы целевых веществ из молекул различного вида минерального или техногенного сырья.

23 Computer–Aided Software Engineering (средства автоматизированной разработки программного обеспечения)

В экономике каждому источнику природного и техногенного сырья соответствует определенное предприятие добывающей или перерабатывающей промышленности. Выбор рациональной схемы химического способа производства ХП должен осуществляться химиками–технологами, специалистами по «зелёной химии» и промышленной экологии, при активном участии логистиков и специалистов по производственно–операционному управлению предприятиями НГХК.

При выборе рациональных схем химического способа производства любой ХП необходимо использовать принципы «зелёной» химии и учитывать воздействие химических процессов на ОПС. Воздействие химических процессов на ОПС зависит не только от этих отдельных химических процессов, но и от того, насколько они в структуре ХТС взаимосвязаны с другими химическими процессами, а также с источниками природного и техногенного сырья. Выявление тех химических процессов, которые могут быть эффективно объединены в общую цепь поставок, — это трудная неформализованная задача.

Выбор большинства экологически дружелюбных и наиболее экономически выгодных маршрутов химического синтеза — не менее сложная неформализованная задача. Задача еще более усложняется, когда рассматривается полная ЦП производства некоторого продукта в некотором регионе или в целом в государстве. Для того чтобы изучить эту цепь поставок, требуется исследовать интегрированные топологические модели в виде различных классов материальных потоковых графов, энергетических потоковых графов и параметрических потоковых графов для различных предприятий НГХК. Такого типа топологические модели (или графы) в настоящее время уже разработаны. Так, например, учеными США разработаны основные модели материальных и энергетических потоков для более чем 400 ХТС, которые обеспечивают производство более чем 200 видов химических продуктов. Эти топологические модели материальных и энергетических потоков взаимосвязанных ХТС соответствуют комплексным ЦП предприятий НГХК. Понимание покомпонентных составов и структуры

взаимосвязей материальных потоков в этих ЦП может использоваться для принятия оптимальных организационно–управленческих и экономических решений различных уровней.

Сначала материальные потоковые графы могут использоваться, просто чтобы определить потенциальных пользователей и поставщиков химических веществ и определить виды ХТС, которые стратегически взаимосвязаны. Как только потребители и производители химических продуктов определены, материальные и энергетические потоковые графы могут использоваться для разработки физико–химической структуры ЦП, являющейся принципиальной научной основой проектирования оптимальной ОФС ЦП региона или государства в целом.

Ученые Германии разработали модели физико–химической структуры ЦП, которые позволяют решать задачи минимизации расходов ТЭР, использования промежуточных токсичных веществ и использования хлора; проанализировали отклик ЦП на возмущения в поставке ТЭР и ограничения на использование токсичных веществ. Поиск эффективного использования побочных химических продуктов осуществляется в химической промышленности десятки лет. Относительно новым является поиск побочных химических продуктов для использования на предприятиях других отраслей перерабатывающей промышленности.

Решения НФЗ разработки оптимальной ОФС ЦП предприятий НГХК тесно взаимосвязаны с решением НФЗ разработки инновационной ХП и ресурсоэнергосберегающих экологически безопасных технологий производства этой ХП, а также задач управления жизненным циклом ХП с применением «CALS»–технологий. На рис. 2.6.1 представлена блок–схема методологии организационно–функционального проектирования «зелёных» ЦП.

Концепция «ЗР — ЗЕ» — это концепция взаимосвязи видов деятельности специалистов–химиков и химиков–технологов при «разработке молекулярной структуры продукта» («Product Engineering»), «разработке химико–технологической системы» («Process Engineering») и «разработке проекта завода» («Plant Engineering»)

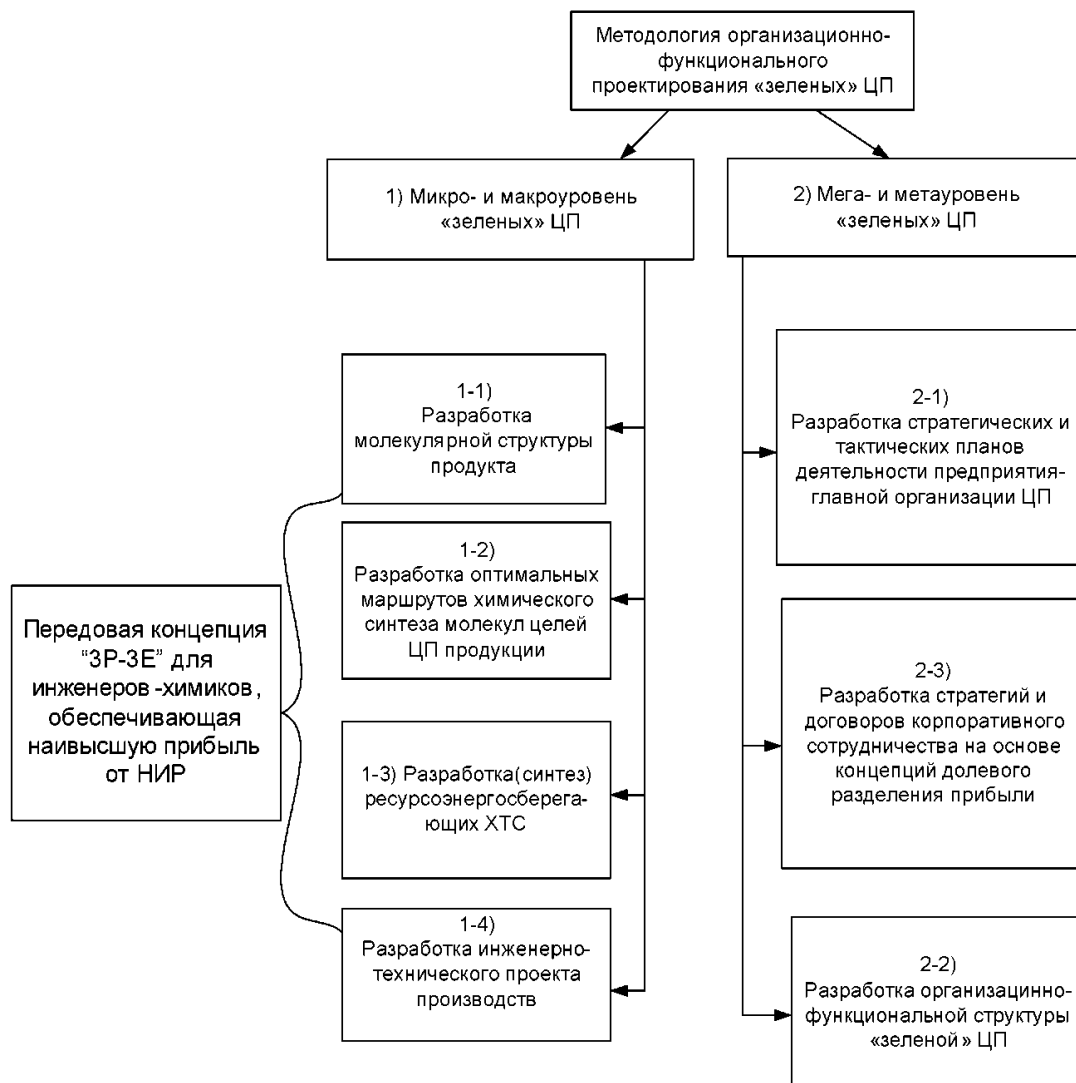


Рисунок 2.6.1. Блок–схема методологии организационно–функционального проектирования «зелёных» цепей поставок

Указанная методология состоит из двух основных уровней:

1. Микро– и макроуровень (или физико–химический уровень) «зелёной» ЦП;
2. Мега– и метауровень (или аппаратурно–технический и организационно–управленческий уровень) «зелёной» ЦП.

Обобщенная блок–схема цепи поставок химической продукции с учетом двухуровневой методологии организационно–функционального проектирования представлена на рис. 2.6.2.

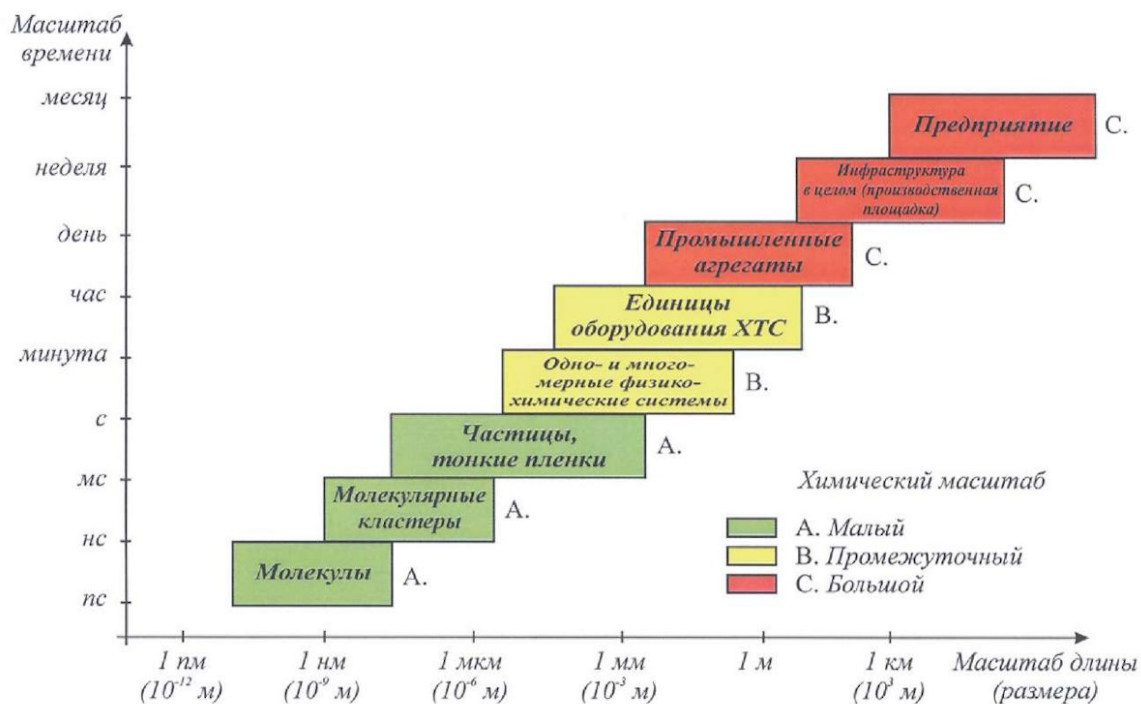


Рисунок 2.6.2. Цепь поставок химической продукции: физико-химическая и аппаратурно-техническая (технологическо-организационная) структура цепи поставок (Grossman, Westerberg, 2000)

При решении задач разработки и управления эксплуатацией ресурсо-энергосберегающих экологически безопасных ХТС и ХЭТС необходимо использовать основные термодинамические, химические, инженерно-технологические принципы «зелёной» химии (см. раздел 2.1). Практическая промышленная реализация ряда из этих принципов:

- предотвращение образование отходов;
- выбор наиболее безопасного маршрута химического синтеза;
- эффективное использование энергии;
- использование возобновляемого сырья;
- безопасное превращение и преобразование продуктов после их использования по назначению;
- предотвращение и непрерывный контроль загрязнений;
- использование действительно безопасных веществ для предотвращения химических аварий и несчастных случаев;

возможна только на основе применения организационно–технологических и организационно–управленческих методов логистики ресурсоэнергосбережения, или «зелёной» логистики.

При разработке рациональной ОФС «зелёных» цепей поставок предприятий НГХК и методологии ситуационного управления эксплуатацией «зелёных» ЦП необходимо широко использовать не только принципы «зелёной» химии, но также международные стандарты серии ISO–9000, ISO–14000, ISO–19000 и OHSAS–18000, и, кроме того, учитывать мероприятия по реализации программы «Ответственная забота» («Responsible Care») и «REACH»–законодательство.

Основные цели общественной международной программы «Ответственная забота», входящей в программу ООН по окружающей среде (UNEP) и применяемой в 52 странах мира, способствуют широкому использованию на предприятиях НГХК международных стандартов ISO–9000, ISO–14000, ISO–19000 и OHSAS–18000 с целью обеспечения устойчивого развития, выполнения международных стандартов открытой отчётности, управления качеством продукции, создания партнёрских отношений с органами власти, некоммерческими организациями и общественностью, создания безопасных условий труда, выполнения требований техники безопасности и охраны ОПС. В России пионерами в реализации программы «Responsible Care» являются ОАО «Нижнекамскнефтехим», ОАО «Щекиноазот», ОАО «Апатит» и ОАО «Химпром».

2.7. Расширенный термодинамический пинч–метод инжиниринга энергосберегающих производственных комплексов

Производственный комплекс включает в себя несколько отдельных ХТС, других производственных систем, а также различные системы энергоснабжения промышленного предприятия. В основе методологии разработки оптимальных энергосберегающих производственных комплексов лежит расширенная концепция пинч–метода. Эта методология предусматри-

вает проектирование каждой ХТС и системы энергоснабжения комплекса таким образом, чтобы в рамках всего комплекса потребление различных топливно–энергетических ресурсов (ТЭР), в том числе тепла и механической энергии было оптимальным. На рис. 2.7.1 представлена типовая схема химического производственного комплекса.

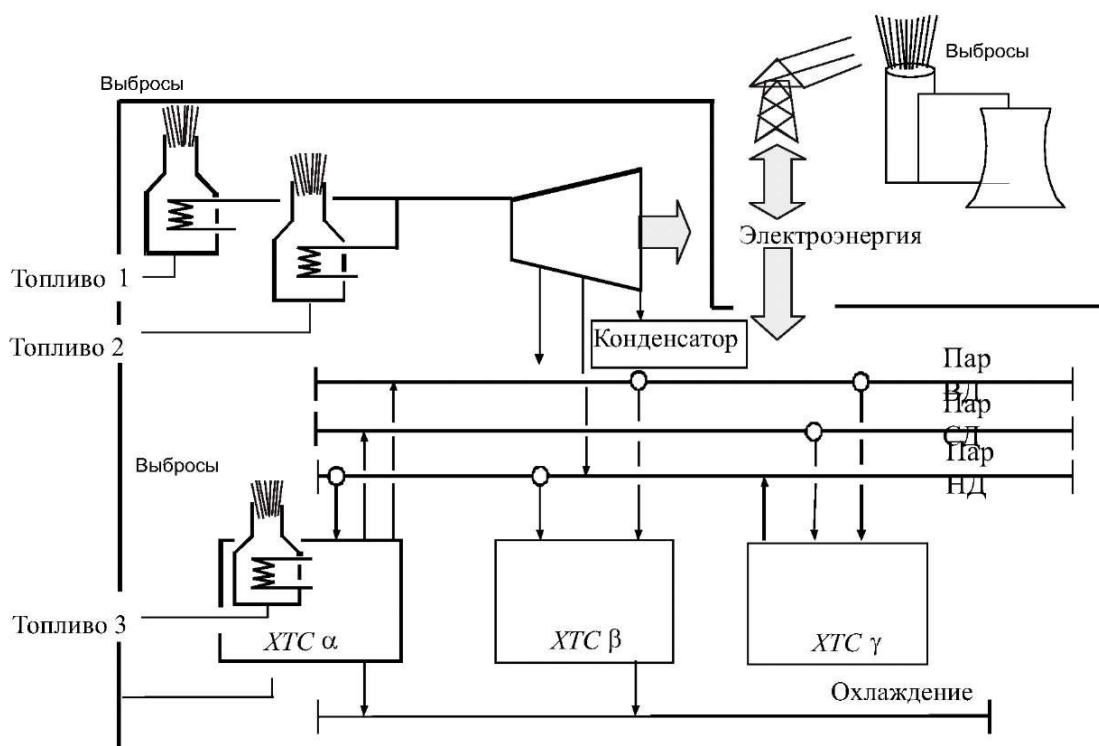


Рисунок 2.7.1: Схема химического производственного комплекса.

Некоторым ХТС требуются локальные системы энергоресурсов, другие ХТС используют общую центральную систему энергоснабжения комплекса, которая в одних случаях может быть размещена на данном предприятии, а в других случаях система энергоснабжения может быть внешней по отношению к комплексу, или предприятию. Системы энергоснабжения используют либо местное топливо, либо топливо, импортированное из–за пределов производственного комплекса, а также импортированную либо произведенную совместно с теплотой механическую энергию. Обычно ХТС проектируются и управляются как самостоятельные системы инженерами одних подразделений компании или внешними подрядчиками, в то

время как центральные энергетические службы разрабатываются и управляются инженерами других подразделений или другими подрядчиками. Инфраструктура предприятия развивается без учета совокупных потребностей. Несколько отдельных ХТС могут располагаться на различных участках предприятия и управляться как самостоятельные подразделения.

Такое положение дел приводит к неоправданным расходам энергоресурсов. Чтобы улучшить эффективность энергопотребления предприятия необходимо применить такой подход к проектированию и модификации ХТС, а также к планированию потребления энергоресурсов, чтобы можно было использовать общую целевую функцию при производстве продукции с минимальным использованием энергии и капитальных затрат.

Энергетическая кривая производственного комплекса

Эффективность использования горячих и холодных энергоресурсов в ХТС можно проанализировать с помощью графиков больших составных кривых (БСК). График БСК показывает эффективность использования различных энергоисточников. С помощью графика БСК, можно разработать оптимальный вариант проекта как ХТС, так и систем энергоснабжения.

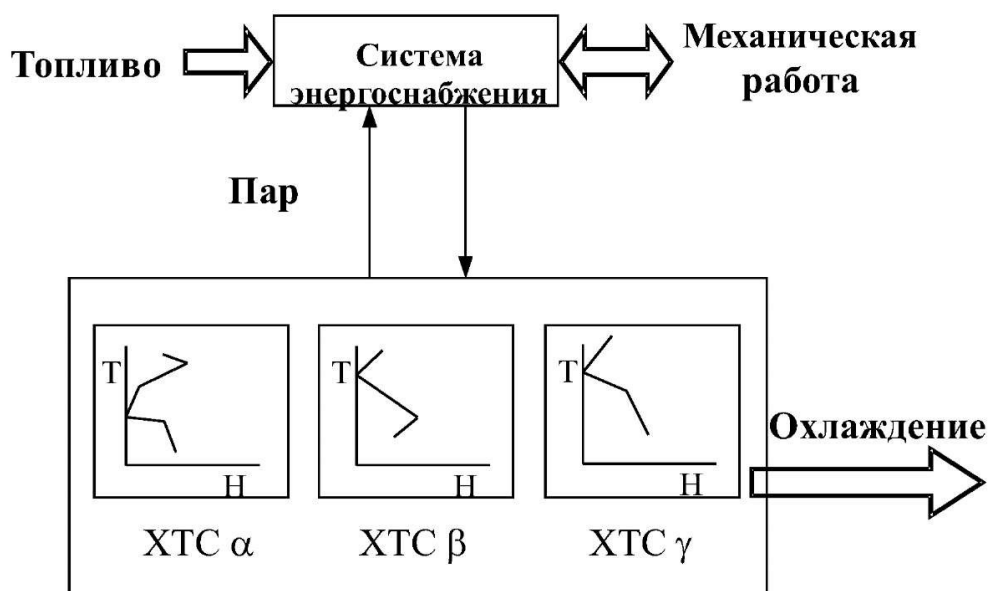


Рисунок 2.7.2. Тепловые потоки трех ХТС (ХТС α, ХТС β, ХТС γ), представленные в виде больших составных кривых.

На рис. 2.7.2 представлены для трех ХТС графики их БСК. БСК каждой ХТС указывает, каким количеством тепла обладает каждый температурный интервал после того, как были осуществлены все возможные тепловые объединения потоков внутри ХТС. Кривая над пинч-точкой отображает потребителя тепла, а кривая ниже точки пинча — источник тепла.

Далее строят тепловую кривую источников тепла производственного комплекса путем объединения всех источников тепла всех ХТС данного производственного комплекса, аналогично тому, как строят горячую составную кривую для отдельной ХТС (рис. 2.7.3).

Наличие на графиках БСК ХТС «карманов рекуперации тепла» позволяет проектировщику либо включать составляющие их тепловые потоки в энергетическую кривую производственного комплекса, и таким образом увеличивать число степеней свободы при проектировании, либо не включать эти тепловые потоки в энергетическую кривую, уменьшая степень свободы при проектировании.

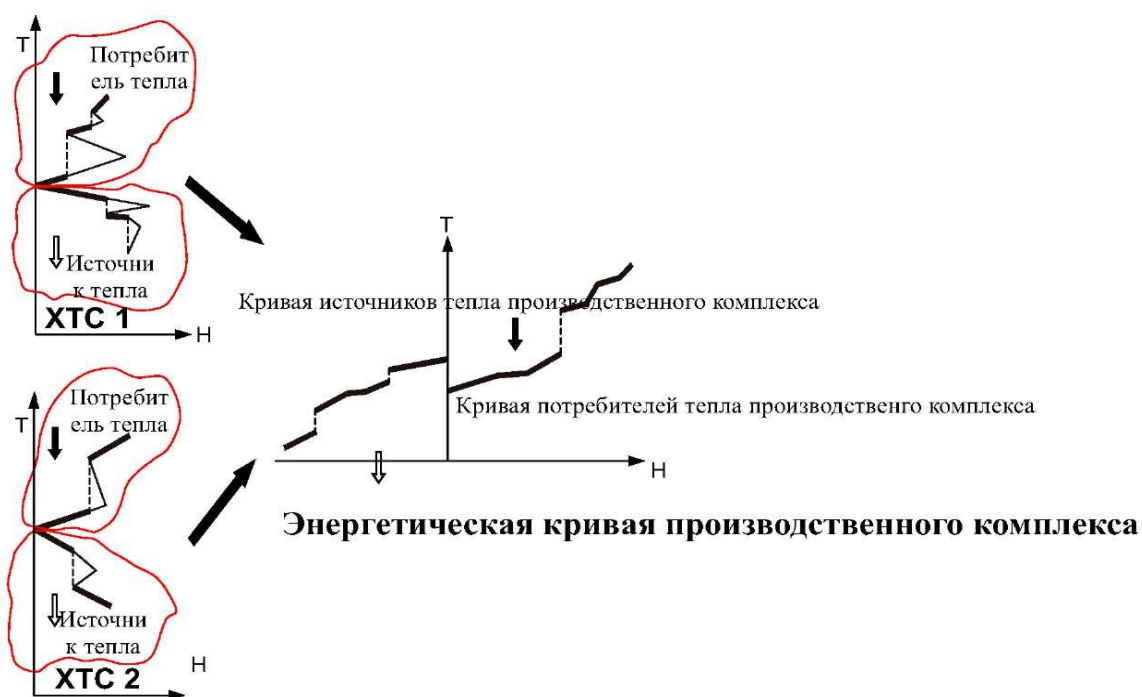


Рисунок 2.7.3. Построение энергетической кривой производственного комплекса, состоящего из двух ХТС.

Аналогично, строят тепловую кривую потребителей тепла производственного комплекса, которая получается путем объединения всех потребителей тепла всех ХТС данного производственного комплекса, подобно холодной составной кривой отдельной ХТС. В совокупности кривые производственного комплекса дают полную и одновременную картину избытка и дефицита тепла для всех ХТС производственного комплекса.

На рис. 2.7.4 показано расположение энергоносителей (магистралей пара) на графике энергетической кривой комплекса. С помощью графика в координатах «коэффициент цикла Карно η_c – энтальпия» можно избежать громоздкой процедуры моделирования, поскольку по этому графику можно определить целевые значения показателей совместного генерирования тепла и механической работы, а также потребления топлива.

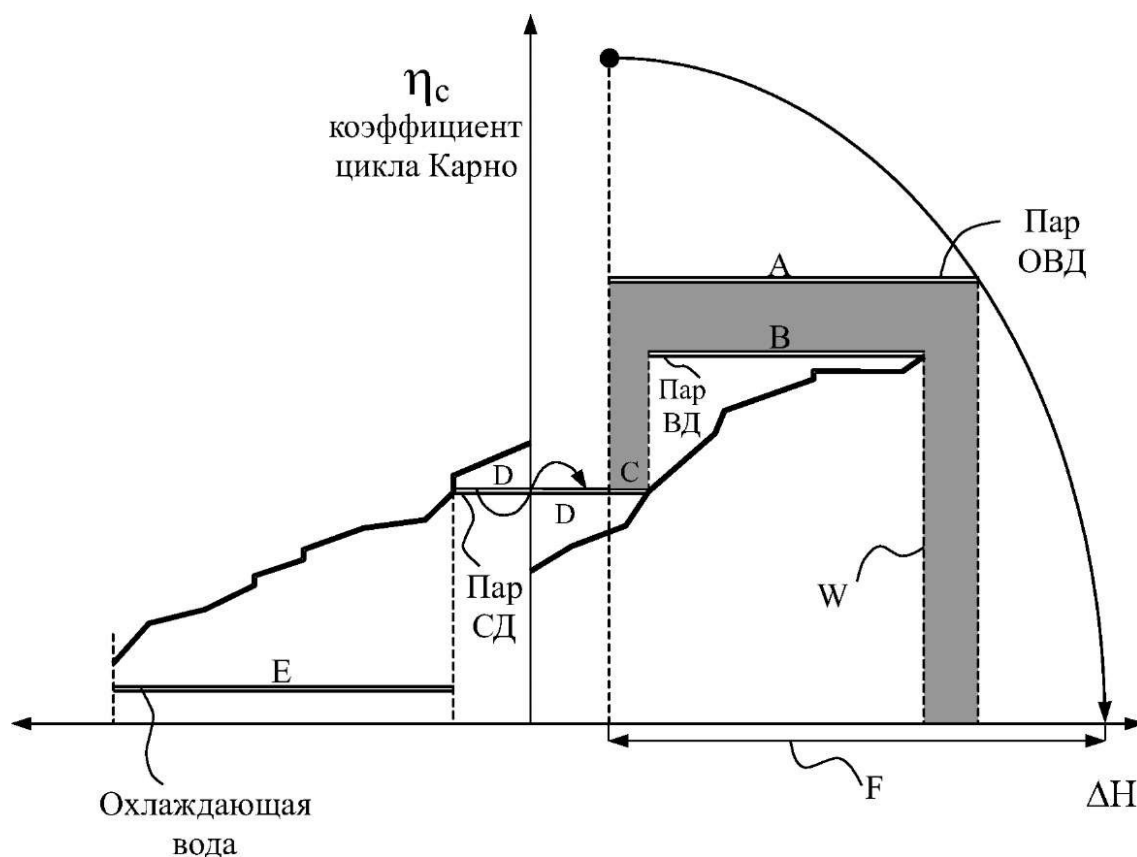


Рисунок 2.7.4. Расположение энергоносителей в производственном комплексе.

Приведенная ниже энергетическая кривая производственного комплекса дает проектировщику ценную информацию о генерировании пара среднего

давления (СД) всеми ХТС, как это показано на рис. 2.7.4 — уровень D . На этом рисунке генерируемый пар СД удовлетворяет потребность в нагревании для некоторых ХТС (D). Остающуюся потребность в паре СД (C) удовлетворяет система турбин. Потребность в паре высокого давления (ВД), как видно по целевому значению из графика энергетических кривых производственного комплекса, равна (B). Чтобы удовлетворить потребности в паре ВД (B) и остающуюся часть потребности в паре СД (C), необходимо, чтобы центральная котельная комплекса производила (A) единиц пара очень высокого давления (ОВД). Дополнительное количество пара ОВД потребуется для удовлетворения потребности совместного производства тепла и механической энергии.

Потребность в топливе (F) рассчитывается, исходя из графика в координатах "расход топлива — энтальпия". Потребности в охлаждающем энергисточнике для всего производственного комплекса (E) можно также найти из энергетической кривой производственного комплекса. В данном случае охлаждение осуществляется с помощью источника охлаждающей воды CW .

Количество теплоты, которое можно рекуперировать внутри комплекса, направив её в паровые магистрали, рассчитывается из анализа энергетической кривой производственного комплекса (рис. 2.7.3 и 2.7.4). Когда смещают кривую потребителей тепла и кривую источников тепла, образуется область перекрытия, отображающую количество рекуперированной теплоты Q_{rec} , которую можно направить в паровые магистрали. Рекуперация тепла достигает предела, когда график потребителей тепла касается графика источников тепла (рис. 2.7.5).

Положение пинч–точки на составных энергетических кривых комплекса показывает, что рекуперация тепла в данном комплексе достигла максимума. Остающуюся потребность комплекса в тепле удовлетворяют подачей пара ОВД из центральной котельной.

Ниже пинч–точки избыток тепла устраняется охлаждающей водой CW или производством пара низкого давления (НД) или конденсирующейся

охлаждающей водой CW. Темная область на рис. 2.7.4 (W), ограниченная графиками потоков пара, пропорциональна потенциально совместному производству тепла и механической энергии, возможному для данной системы энергоресурсов предприятия. Уровни пара отмечены как пар ОВД, ВД, пар СД, промежуточный пар, пар НД.

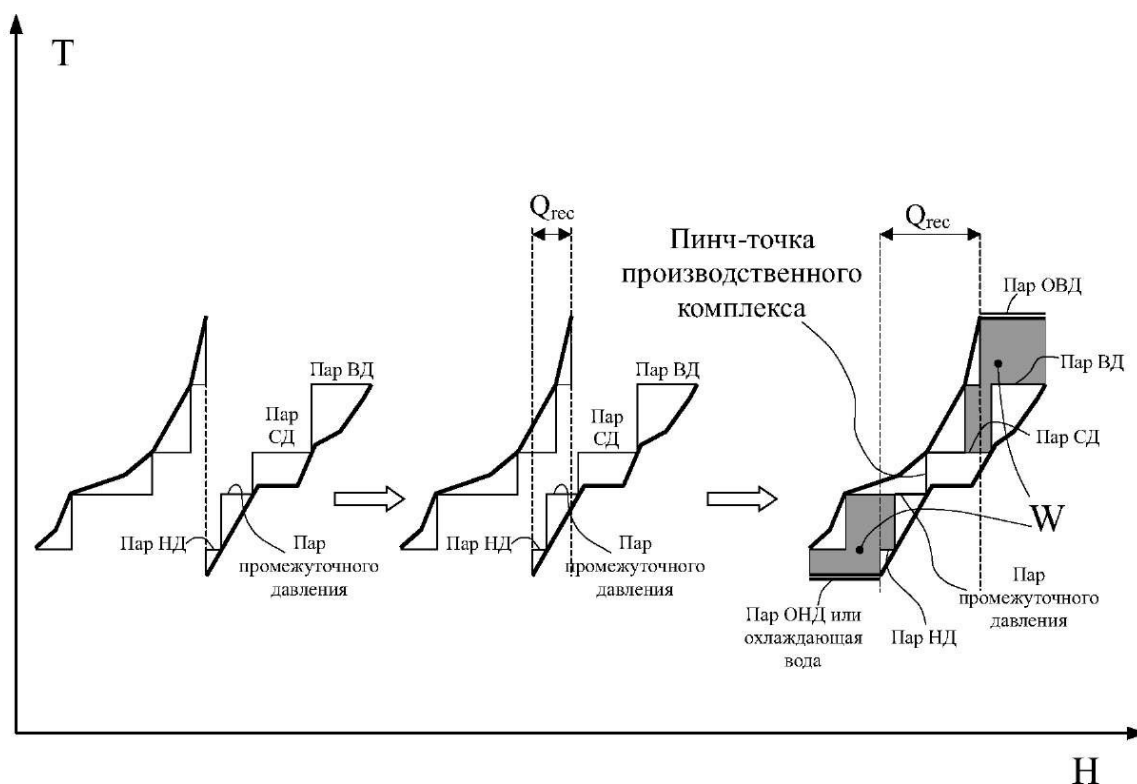


Рисунок 2.7.5. Построение составных кривых производственного комплекса и определение пинч-точки производственного комплекса.

Построение и анализ энергетической кривой производственного комплекса представляют собой уникальный аналитический инструмент, который можно использовать для получения целевых значений потребности в топливе, рассчитанных по данным о выработке пара ОВД центральной котельной, рекуперации тепла и возможной совместной выработке тепла и механической энергии внутри комплекса.

Большая составная кривая энергоресурсов производственного комплекса является еще одним видом составных энергетических кривых производственного комплекса (рис. 2.7.6), которая дает проектировщику инструмент для определения возможности совместного генерирования тепла и

механической энергии. На стадии получения целевых значений проектировщику остается только проанализировать варианты как для системы энергоресурсов, так и для ХТС, которые являются наиболее перспективными по энергосбережению. Все варианты рассматриваются с точки зрения расхода топлива и механической энергии.

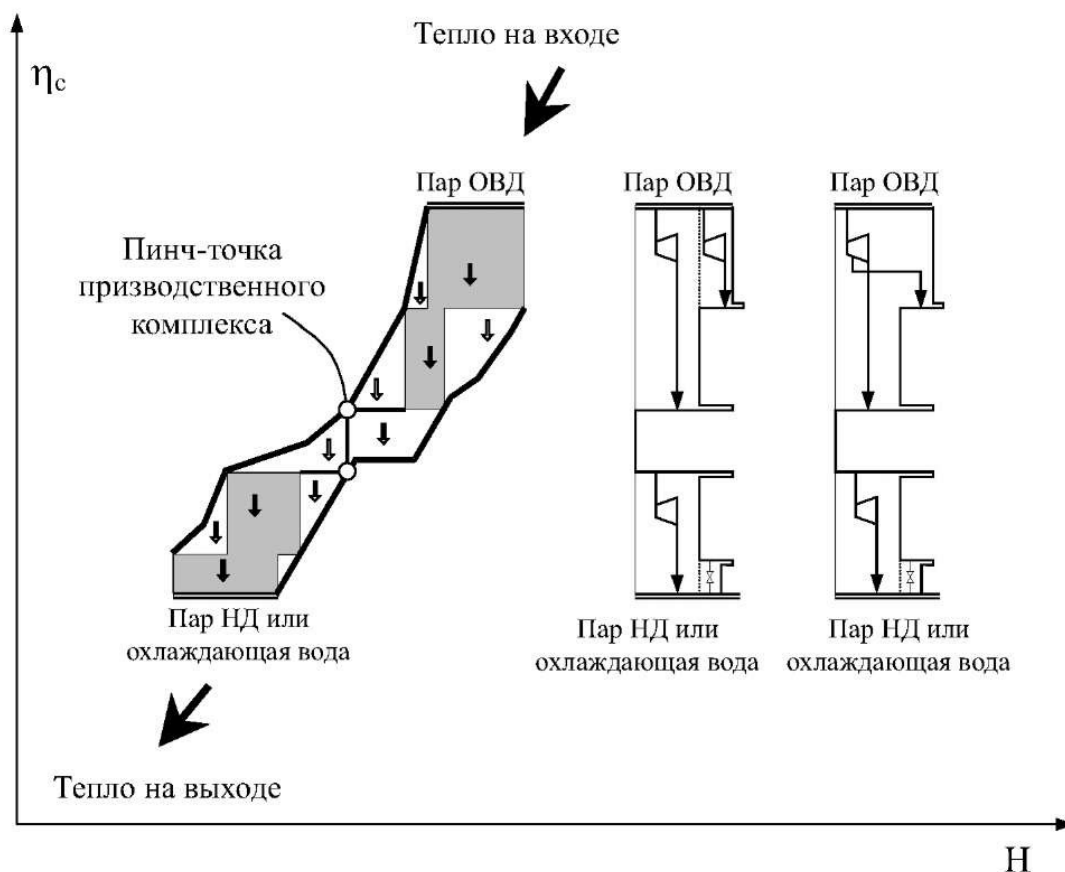


Рисунок 2.7.6. Составные кривые производственного комплекса и большие составные кривые энергоресурсов производственного комплекса.

Сбалансировав потребности в энергии, имеющейся внутри комплекса, и энергии, импортированной извне, можно задать целевые значения глобальных газовых выбросов. На рис. 2.7.7 показана блок-схема процедуры целевых значений для производственного комплекса. Необходимо принять экономические решения и проанализировать компромиссы при внесении изменений в ХТС, инфраструктуру комплекса, потребности в расходах топлива и пара. Эти решения необходимо проанализировать с глобальных по-

зиций и данная процедура повторяется для того, чтобы выявить набор сценариев, которые отвечали бы различным критериям. В случае, если целевые значения отвечают заданным условиям и ограничениям, проектировщик может с уверенностью разрабатывать стратегию развития производственного комплекса, которая учитывала бы эффект от долго- и краткосрочных инвестиций.

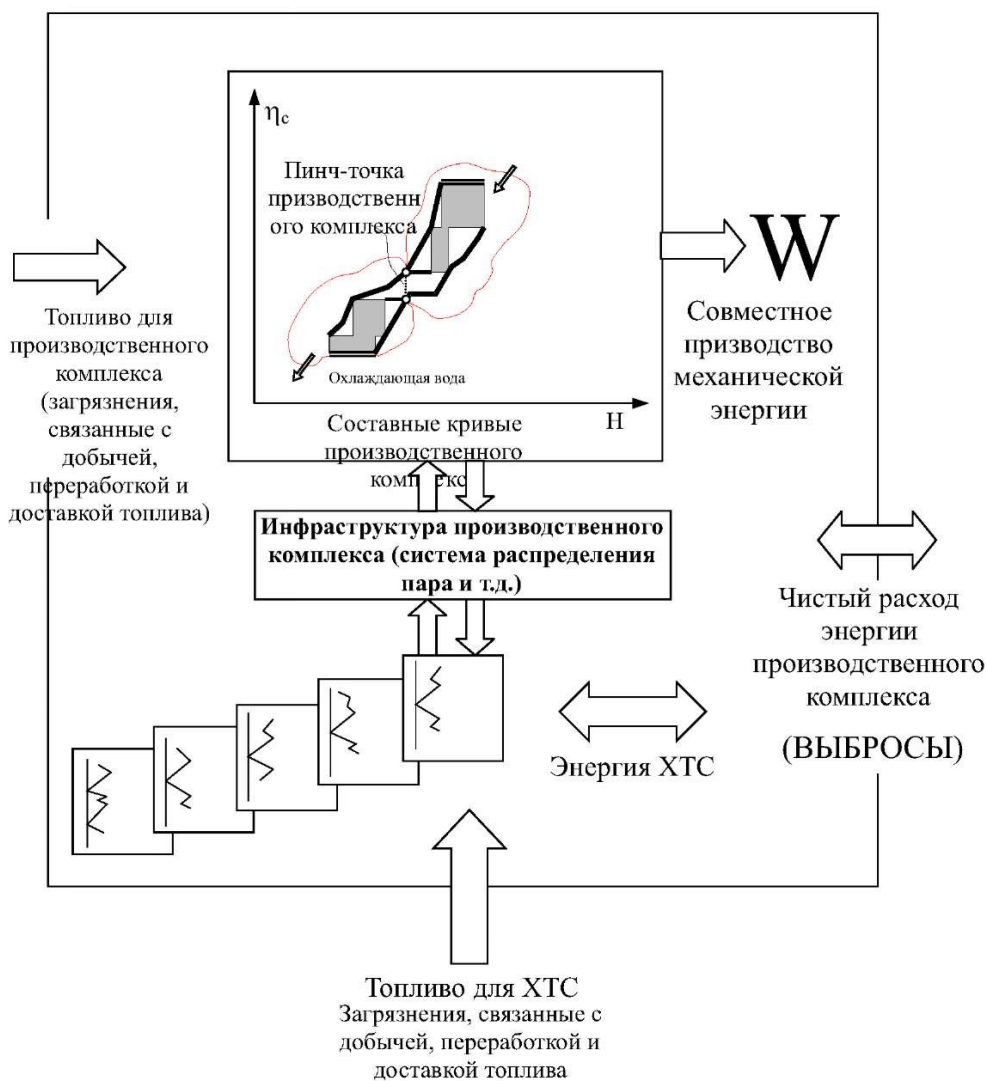


Рисунок 2.7.7. Блок-схема процедуры определения целевых значений для производственного комплекса.

Воздействие производственного комплекса на окружающую среду должно находиться в центре внимания руководителей и управляющих комплекса во-первых, благодаря ответственному отношению руководства к

проблеме защиты окружающей среды, а во-вторых, из-за существования природоохранных законодательных актов (ныне действующих или ожидаемых в будущем), требования которых необходимо соблюдать. В некоторых случаях компании предпринимают дополнительные шаги в области охраны окружающей среды при создании и эксплуатации энергосберегающих производственных комплексов для улучшения своего имиджа в глазах общественного мнения.



Рисунок 2.7.8. Воздействия производственного комплекса на окружающую среду

Рассматриваемая процедура принимает во внимание воздействие на окружающую среду факторов, включая те, которые непосредственно не относятся к данному производственному комплексу, например, экологическое воздействие электростанций или загрязнение, вызываемое сжиганием топлива в различных подсистемах логистической цепи данного предприятия (добыча сырья и материалов, их транспортировка и т.д.) (рис. 2.7.8).

Основные загрязняющие агенты, которые нужно учитывать при использовании методологии проектирования оптимальных энергосберегающих производственных комплексов, — это NO_x , SO_x , CO_2 , H_2S , HCl и некоторые другие. Выбросы этих веществ характерны для оборудования, сжигающего топливо, такого как котлы, печи, газовые турбины и двигатели внутреннего сгорания.

2.8. Краткая характеристика принципов автоматизированного синтеза оптимальных энергоресурсоэффективных химико–технологических систем

В настоящее время применяются следующие принципы автоматизированного синтеза энергоресурсосберегающих ХТС:

- декомпозиционно–поисковый,
- эвристическо–декомпозиционный,
- интегрально–гипотетический,
- эволюционный.

Указанные принципы комплексно отражают эвристические, технологические и математические положения теории упорядоченного поиска оптимальных решений разнообразных исходных задач синтеза (ИЗС) энергоресурсоэффективных ХТС.

Постановка любой исходной задачи синтеза ХТС определяется множеством данных — $\{P\}$, отображающим желаемые цели, параметры и свойства функционирования синтезируемой ХТС, которыми являются надежность, устойчивость, чувствительность, управляемость и др., а также некоторые физико–химические и технологические предпосылки, обеспечивающие возможность выполнения системой поставленной цели функционирования.

Для каждой ИЗС– P существует оптимальное решение, где $P^* \in \{P\}$, где $\{P\}$ — множество всех решений в виде альтернативных вариантов структуры синтезируемой ХТС. Решение P^* представляет собой такую оптимальную структуру ХТС, для которой величина критерия эффективности функционирования — ψ экстремальна.

В качестве критерия эффективности — ψ , который комплексно учитывает стоимость всех затрат сырья, топливно–энергетических ресурсов и конструкционных материалов при создании и эксплуатации системы, имеющей определенный уровень надежности, нами предлагается использовать обобщенный экономический критерий в виде приведенного дохода D_{np} —

для неоднородных ХТС ($\psi_1^* = \text{opt } \psi_1 = \max D_{np}$) или в виде приведенных затрат — Π для однородных систем ($\psi_2^* = \text{opt } \psi_2 = \min \Pi$).

Разнообразные исходные задачи синтеза оптимальных ХТС, которые возникают при проектировании ресурсосберегающих производств, нами подразделены на три группы: задачи структурно–параметрического, структурного и параметрического синтеза. Сформулированы содержательные постановки выделенных нами классов ИЗС.

Сущность декомпозиционно–поискового принципа состоит в том, что трудоемкость многомерного поиска $P^* \in \{P\}$ сокращают как за счет декомпозиции многомерной исходной задачи синтеза ХТС на совокупность более простых задач, так и за счет перебора только лишь перспективных или рациональных вариантов решения ИЗО.

Рассмотрим методику декомпозиции задач синтеза ХТС. Любое решение ИЗС — $P_i \in \{P\}$ будем отыскивать как совокупность решений хотя бы двух более простых подзадач, образовавшихся в результате декомпозиции ИЗС. Одна из этих подзадач представляет собой либо элементарную задачу — P_s (элементарная декомпозиция), либо произвольную задачу — S_q (произвольная декомпозиция ИЗС). Решение каждой элементарной задачи — это тривиальное решение $\{P_s\} = R$ в виде одного технологического аппарата; решение S_q соответствует фрагменту структуры ХТС.

Декомпозиция ИЗС осуществляется путем эвристического выбора множества переменных декомпозиции — T , соответствующих параметрам возможных промежуточных потоков синтезируемой системы, следующим образом:

$$P = \bigcup_k P_k, S_k = P_k \cup T_k, \bigcap_k P_k = \emptyset, (\forall k) S_k = P_s \text{ либо}$$

$$P = \bigcup_q P_q, S_q = P_q \cup T_q, \bigcap_q P_q = \emptyset, (\forall k) S_q = P_s.$$

Нами сформулированы с использованием метода ветвей и границ необходимые условия решения ИЗС на основе декомпозиционно–поисковой процедуры:

- 1) $P \notin R$;

2) $\{P\} = \cup_i P_i$, где $i \geq 2$ – число альтернативных решений задачи;

3) критерий ψ , вычисляемый на множестве решений ИЗС, имеет декомпозиционную форму:

$$\Psi(P_i \in \{P\}) = \begin{cases} \sum_j \Psi_{эj}(P_{эj-i}) \text{ при } P_i = \cup_j P_{эj-i}, P_{эj-i} \in R \\ \sum_k \Psi_k(\{S_{k-i}\}) \text{ при } P_i = \cup_k \{S_{k-i}\}, P_i \cap S_{k-i} = \emptyset, \{S_{k-i}\} \notin R \end{cases}$$

где i – этап декомпозиционной задачи; j, k – номер подзадачи синтеза.

Нами показано, что задачу синтеза ХТС на основе декомпозиции ИЗС можно представить как двухуровневую эвристическо–вычислительную задачу оптимизации.

На первом уровне определяют оптимальную технологическую топологию ХТС — G^* путем эвристического выбора различных вариантов декомпозиции P . Для реализации этого эвристического выбора нами предложено использовать модели представления знаний в области химической технологии в виде семантических, или смысловых графов (деревьев). На первом уровне определяют оптимальные значения переменных декомпозиции T^* путем численного решения многомерной задачи нелинейного программирования с использованием предложенных нами оригинальных методов.

Для сокращения трудоемкости операций поиска оптимального решения ИЗС декомпозицию множества решений ИЗС будем осуществлять с использованием либо граничной, либо отсекающей декомпозиции. Граничная декомпозиция сводит поиск оптимального решения ИЗС к поиску на множестве решений $\{\tilde{P}_1\}, \{\tilde{P}_2\}, \dots, \{\tilde{P}_n\}$, упрощенных по сравнению с ИЗС задач — $\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n$, называемых граничными задачами синтеза (ГЗС). Исходные данные ГЗС — P_i отличаются от P введением дополнительных ослабляющих ограничений. Решение каждой ГЗС становится решением исходной задачи только при выполнении специальных условий, которые нами сформулированы на основе использования метода ветвей и границ. Рассмотрены примеры формирования граничных задач для различных ИЗС; методика формирования ГЗС при решении задач синтеза теплообменных и ректификационных систем.

Отсекающая декомпозиция, использующая верхнюю (\bar{Q}) и нижнюю границы (Q) значений критерия ψ синтезируемых ХТС, позволяет определить P^* путем перебора только в подмножестве перспективных решений $\{E\}$, образовавшихся при декомпозиции, т.е. $P^* \subset \{E\} \subset \{P\}$. Для величины критерия эффективности любого перспективного решения ИЗС — $P_i \in \{E\}$ справедливо соотношение: $\Psi^*(P_i \in \{E\}) = \max = \bar{Q}_i > Q_0$.

Реализация поиска P^* только в подмножестве $\{E\}$ осуществляется с помощью операций упорядоченного перебора на семантических графах (деревьях) решений ИЗС, методика построения которых предложена нами.

Сущность эвристическо–декомпозиционного принципа синтеза ХТС состоит в том, что поиск оптимального решения ИЗС проводится путем упорядоченного перебора множества эвристических решений, которые получены в результате заданного числа попыток синтеза системы. При одной попытке получают некоторое эвристическое решение ИЗС на основе элементарной декомпозиции исходной задачи. Любая элементарная задача синтеза образуется в соответствии с выбранным эвристическим правилом (или эвристикой), входящим в определенный набор эвристик. Под эвристикой нами понимается утверждение, являющееся результатом, обобщения существующих научных знаний в области теоретических основ химической технологии и кибернетики химико–технологических процессов, либо некоторое интуитивное или эмпирическое предположение исследователя, которое может привести к рациональному решению задачи синтеза ХТС.

Выбор эвристики осуществляется случайным образом по величине её весового коэффициента, значение которого изменяется в зависимости от результатов предыдущих попыток синтеза с использованием предложенных нами алгоритмов обучения.

Рассмотренные декомпозиционные принципы обеспечивают методологию генерации оптимальных технологических структур ХТС, которая осуществляется как в диалоговом, так и в автоматизированном режимах.

Указанные процедуры позволяют разработать методы автоматизированного решения многомерных задач структурно–параметрического синтеза ХТС при неполной исходной информации.

Для того, чтобы создать алгоритмы переработки информации, которые реализуют декомпозиционные принципы синтеза ХТС, нами предложено операции генерации и выбора оптимальных решений задач синтеза отображать в виде семантических деревьев двух классов — деревьев декомпозиции ИЗС и деревьев вывода решений ИЗС. Вершины деревьев декомпозиции соответствуют постановкам более простых задач, образованных при многоуровневой декомпозиции ИЗС.

Нами разработана методика построения двух видов деревьев вывода решений — деревьев граничных задач синтеза (ГЗС) и деревьев вариантов решений. Вершины дерева граничных задач соответствуют постановкам ГЗС, возникающих при сведении исходной задачи к иерархической совокупности упрощенных задач синтеза. Дерево вариантов решений отображает иерархический процесс генерации (вывода) решений задачи синтеза и упорядоченного поиска оптимального решения.

Нами используются три операции упорядоченного перебора вершин дерева вариантов: «волнового ветвления», «лучевого ветвления», «волнолучевого ветвления». Каждая из этих операций устанавливает порядок выбора среди всех висячих вершин только активных вершин, отображающих перспективные решения задач синтеза.

Чтобы в процессе поиска решений ИЗС можно было определять некоторое множество квазиоптимальных структур ХТС, нами предложено использовать модифицированное значение верхней границы — $Q^* = \alpha \bar{Q}$, $1 < \alpha \leq 1,3$. Коэффициент α позволяет осуществить выбор P^* с учетом значений характеристик и свойств функционирования системы, которые ранее не рассматривались при постановке ИЗО, чтобы не увеличивать сложность её решения.

Интегрально–гипотетический принцип синтеза ХТС включает следующие этапы:

1. Разработка и анализ альтернативных вариантов технологической структуры ХТС.
2. Создание гипотетической обобщенной технологической структуры (ГОТС) путем функционально–логического объединения всех альтернативных вариантов структуры данной ХТС. Каждая структурная взаимосвязь между n -м и m -м элементами в ГОТС отображается коэффициентом δ_{n-m}
3. Анализ ГОТС. Для проведения анализа ГОТС необходимо иметь математические модели всех ХТП системы и рекомендуется применять разработанные нами быстродействующие методы расчета многоконтурных ХТС.
4. Вычленение из ГОТС оптимальной структуры синтезируемой ХТС путем решения многомерной дискретно–непрерывной задачи нелинейного программирования:

$$\Psi^* = \underset{\delta_{n-m_j}}{\text{optimum}} \sum_{n=1}^N \Psi_n \{ x_{n-1}, \dots, x_{N_i(n)}, y_{n1}, \dots, y_{n_i(n)}, \alpha_n \}$$

при условии:

$$y_{n_i} = f_{n-1}(x_1, \dots, x_{N_i(n)}, \alpha_n)$$

$$x_{n_i} = \sum_m^M \sum_j^{J_m} \delta_{n_i-m_j} y_{m_j}$$

$$\sum_n^N \sum_i^{I(n)} \delta_{n_i-m_j} = 1, 0 \leq \delta_{n_i-m_j} \leq 1$$

$$h_{n_i}(x_{n_1}, \dots, x_{n_{i(n)}}, y_{n_1}, y_{n_{j(n)}}, \alpha_n) \geq 0$$

где $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$ – число элементов; $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$ – число входных и выходных потоков элементов; y_{n_i} и y_{n_j} – параметры потоков; α_n – технологические и конструкционные параметры.

Для решения задачи нелинейного программирования (1)–(6) нами разработан быстродействующий многоуровневый метод оптимизации.

Интегрально–гипотетический принцип нами рекомендуется применять для разработки методов решения задач синтеза ХТС на заданном множестве альтернативных вариантов ХТП и структурных связей между ними.

Эволюционный принцип включает следующие этапы:

1. Анализ некоторого исходного варианта технологической структуры ХТС.
2. Определение наименее эффективного элемента в исходном варианте системы. Исключение этого элемента из системы.
3. Модификация выделенного элемента ХТС.
4. Ввод модифицированного элемента в исходный вариант системы и коррекция структуры технологических связей ХТС. Практическая реализация 2–4 этапов связана с необходимостью использования различных эвристик, а также многоуровневых методов оптимизации и методов теории чувствительности.
5. Анализ и оптимизация полученного, варианта системы, т.е. определение

$$\Psi^* = \text{opt} \Psi(G_i).$$

Этапы 1–5 итерационно повторяются до тех пор, пока не будет синтезирована оптимальная технологическая структура системы, для которой $\Psi^* = \text{opt} \{\Psi_1^*(G_1), \dots, \Psi_n^*(G_n)\}$. Эволюционный принцип может использоваться при разработке методов решения задач структурного и параметрического синтеза ХТС.

Глава 3. Инжиниринг энергоресурсосберегающих технологий обезвреживания и обработки отходов

3.1. Стратегия минимизации отходов в химико–технологических системах

Сущность концепции минимизации отходов

Обычно вопросы обеспечения безопасности и защиты окружающей среды от загрязнения решаются на последней стадии проектирования ХТС. Однако, что касается безопасности, ранние решения часто могут приводить к сложным проблемам защиты окружающей среды, которые позднее требуют трудоемких комплексных решений. Поэтому лучше рассматривать текущие проблемы очистки выбросов и переработки отходов на каждом этапе проектирования ХТС. Это в дальнейшем позволит избежать создания дополнительных сложных систем переработки отходов и очистки выбросов.

Эффекты от воздействия загрязнений могут быть прямыми, как, например, токсичные выбросы, которые могут содержать смертельные дозы яда для животных и даже для человека.

Эффекты от воздействия загрязнений ХТС могут быть непрямыми. Например, воздействия ядовитых веществ, которые биологически не разлагаются (отходы производства инсектицидов и пестицидов, попавшие в окружающую среду, поглощаются бактериями и входят в «пищевую цепь»). Эти вещества могут оставаться в окружающей среде в течение долгого времени, медленно накапливаясь на каждой стадии «пищевой цепи», пока, в конечном счете, они не оказываются смертельными, главным образом для животных, рыб и птиц на самом вершине «пищевой цепи».

Таким образом, выбросы ХТС не должны превышать предельно–допустимых уровней концентраций вредных веществ. Существует два подхода к борьбе с выбросами и стоками в ХТС:

- Очистка технологических выбросов с использованием процессов сжигания, биологической переработки и т.д. для получения безопасного состава выбросов в окружающую среду. Этот подход называется «очистка на конце трубы».
- Уменьшение или устранение выбросов в источнике их образования в ХТС посредством минимизации отходов.

Проблема очистки выбросов «на конце трубы» состоит в том, что однажды образовавшиеся в ХТС отходы и выбросы не могут быть уничтожены. Они могут быть сконцентрированы или разбавлены, их физическая или химическая форма может быть изменена, но они не могут быть уничтожены.

Таким образом, проблема разработки систем очистки выбросов в ХТС «на конце трубы» состоит в том, что эти системы не дают окончательного решения и проблема перемещается внутри ХТС от одного места к другому. Например, водные растворы, содержащие тяжелые металлы, могут быть очищены химическим осаждением этих металлов. Если система очистки разработана и эксплуатируется правильно, то водный поток может быть передан для дальнейшей очистки или использован в замкнутом водообороте. Осажденные металлы идут в отвал.

Проблема лучше решается, если вначале задаться целью не производить в ХТС отходы, т.е. обеспечить минимизацию отходов. Если отходы в ХТС могут быть минимизированы в источнике, это принесет двойную пользу, уменьшая издержки как на переработку отходов, так и на сырьё.

Выделяют два класса отходов в ХТС.

- Два внутренних слоя диаграммы «луковицы», отображающих методологию проектирования ресурсосберегающих интегрированных ХТС (реакторная система, система разделения и система рециркуляции), производят отходы ХТС. Отходы ХТС — это ненужные побочные продукты, стоки, утечки, сдувочные газы и т.д.
- Наружный слой диаграммы "луковицы" на рис. 3.1.1 (система энергоснабжения, или система энергообеспечения) производит отходы энергоносителей. Отходы энергоносителей состоят из продуктов сго-

рания топлива, горячей воды, питающей котлы установок производства (генерирования) пара (или систем пароснабжения), и т.д. Проектирование систем энергоснабжения ХТС (систем производства энергоносителей, или производства энергоресурсов) тесно связано с проектированием рекуперативных теплообменных систем (ТС). Следовательно, практически нужно рассматривать два слоя «луковицы», как возможные источники всех видов отходов в ХТС.

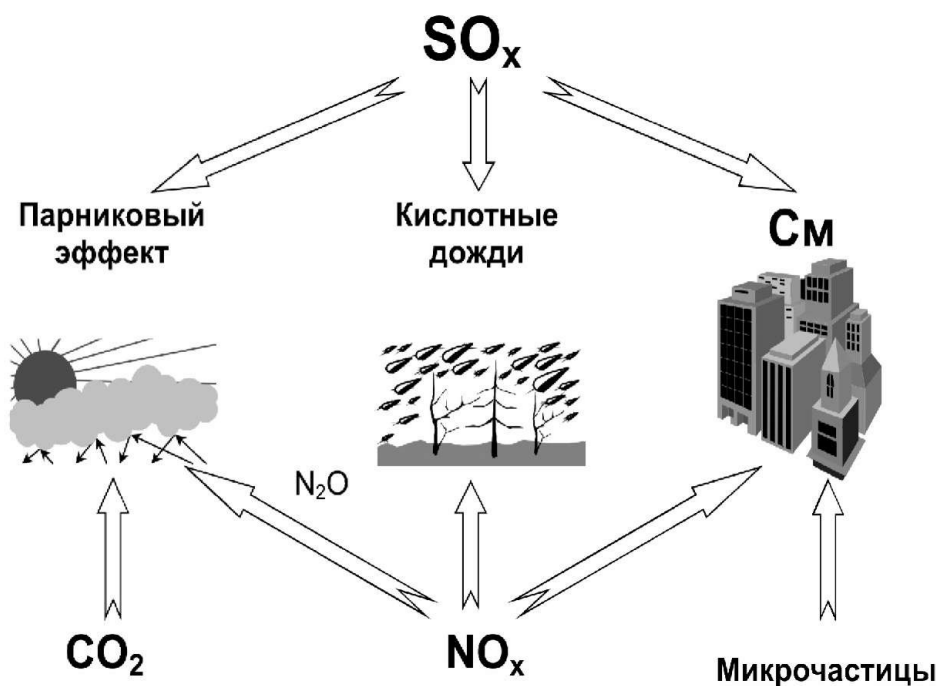


Рисунок 3.1.1. Продукты сгорания топлива различными путями ведут к образованию парникового эффекта, кислотных дождей и смога.

Существует три класса источников отходов в ХТС.

1. **Реакторы.** Отходы в реакторах создаются в результате образования побочных продуктов и т.д.
2. **Системы разделения и системы рециркуляции.** Отходы образуются в системах разделения и системах рециркуляции в результате неполного извлечения ценных веществ из потоков отходов.
3. **Производственные, или эксплуатационные, операции ХТС.** В этом классе источников отходов можно выделить следующие основные виды производственных, или эксплуатационных операций:

- пуск и останов непрерывных и периодических ХТС,
- смена вида выпускаемых продуктов,
- очистка оборудования для текущего ремонта или дальнейшей эксплуатации,
- наполнение емкостей.

При выполнении этих операций также образуются отходы.

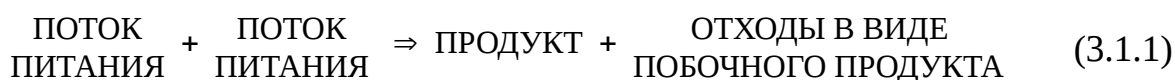
Основные источники отходов энергоресурсов (*utility waste*) связаны с потоками горячих энергоносителей (включая совместное производство тепла и механической энергии) и потоками холодных энергоносителей. Печи, паровые котлы, газовые турбины и дизельные двигатели производят отходы в виде газообразных продуктов сгорания. Эти продукты содержат диоксид углерода, оксиды серы и азота, а также микрочастицы, которые различными способами способствуют образованию парникового эффекта, кислотных дождей и смога. В дополнение к газообразным выбросам, системы генерирования пара создают водные стоки из котлов–утилизаторов и т.д.

Рассмотрим способы уменьшения отходов от каждого из этих источников энергоресурсов или энергоносителей. В следующем разделе будут рассмотрены методы очистки отходов энергоносителей. Поскольку одно из главных направлений методологии проектирования ресурсосберегающих интегрированных ХТС — это минимизация отходов путем обеспечения высоких выходов продуктов ХТС, удаления посторонних веществ и т.д., многие из рассматриваемых способов будут совпадать с ранее рассмотренными. Так как реактор занимает центральное место в ХТС, с него следует начинать рассмотрение проблемы минимизации отходов. Далее идут система разделения и система рециркуляции, далее производственные или эксплуатационные операции и, наконец, отходы энергоносителей.

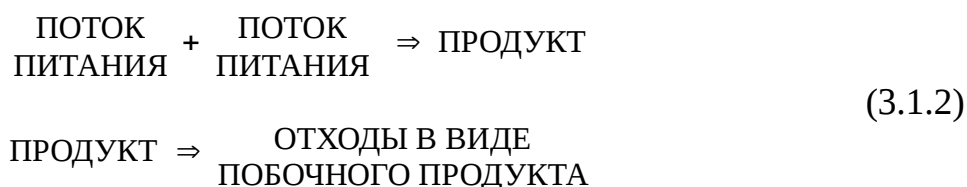
Технологические и организационно–технические способы минимизации отходов в реакторах

При нормальных условиях эксплуатации отходы в реакторах образуются следующим образом.

1. Если нет возможности по ряду причин рециркулировать на вход в реактор непрореагировавший поток питания, то низкая степень превращения будет приводить к образованию отходов от этого непрореагировавшего потока питания.
2. В результате основной реакции могут образовываться ненужные побочные продукты, например:



3. В результате побочной (вторичной) реакции могут образовываться ненужные побочные продукты, например:



Обеспечивая максимальную селективность данной реакции можно минимизировать образование отходов в реакторах для данной реакции.

4. Примеси, содержащиеся в потоках питания могут участвовать в реакции, образуя отходы в виде побочных продуктов.
5. Если отходы в виде побочных продуктов образовались, существует возможность увеличения их количества в последующих реакторных системах.
6. Катализаторы стареют и требуют замены (их выгрузки из реактора) и не могут быть рециркулированы или повторно использованы.

Рассмотрим способы уменьшения отходов в реакторах.

1. Уменьшение отходов в случае трудностей организации рециркуляции.
 - а) Увеличение степени превращения для простой необратимой реакции. Если непрореагировавший поток питания трудно разделить и рециркулировать, необходимо достичь настолько высокой степени превращения в реакторе, насколько это возможно. Если реакция необратимая, то низкая степень превращения может быть повы-

шена, путем увеличения длительности пребывания в реакторе, повышения температуры или давления, а также комбинацией этих способов.

б) Увеличение степени превращения для простой обратимой реакции. Ситуация значительно ухудшается, если для обратимой реакции непрореагировавший поток питания трудно разделить и рециркулировать. Для повышения равновесной степени превращения в обратимой реакции необходимо следующее:

- Избыток реагентов. Можно использовать избыток одного из реагентов.
- Отвод продуктов во время реакции. Разделение продуктов до завершения реакции может дать более высокую степень превращения. Иногда продукт (или один из продуктов) может удаляться из реактора во время реакции, например, путем выпаривания продукта из жидкой фазы.
- Концентрация инертного вещества. Реакция может быть проведена в присутствии инертного вещества. Это может быть растворитель в жидкофазной реакции или инертный газ в газофазной реакции. Если реакция проходит с увеличением числа молей, добавление инертного вещества повышает равновесную степень превращения. С другой стороны, если реакция проходит с уменьшением количества молей, то концентрацию инерта нужно уменьшить. Если же число молей в реакции не изменяется, то инертное вещество не окажет воздействия на равновесную степень превращения.
- Температура реакции. Для эндотермической реакции температура должна быть установлена настолько высокой, насколько это позволяют ограничения по материалам и конструкционным особенностям, активности катализатора и безопасности. Для экзотермической реакции температура будет постоянно понижаться при повышении степени превращения.

- Давление в реакторе. Известно, что для реакций в паровой фазе, проходящих с уменьшением числа молей, должно быть выбрано настолько высокое давление, насколько это практически возможно. Однако необходимо учесть, что экономически получать высокое давление с использованием компрессора может оказаться дорого, а также существуют проблемы обеспечения безопасности. Реакции, протекающие с увеличением числа молей, в идеале должны иметь давление, которое постоянно понижается при росте степени превращения. Уменьшить давление можно или за счет уменьшения абсолютного давления, или ввода инертного разбавителя.

Если создание систем разделения и систем рециркулирования непрореагировавших веществ не представляет затруднений, то увеличение степени превращения в реакторе не является необходимым.

2. Уменьшение отходов от первичных (основных) реакций, которые протекают с образованием отходов в виде побочных продуктов. Если ненужные побочные продукты образовались в результате реакции, (уравнение 3.1.1), то возможно только избегать различных химических реакций, т.е. выбирать рациональные маршруты реакций.
3. Уменьшение отходов для многоэтапных реакций, протекающих с образованием отходов в виде побочных продуктов. В дополнение к потерям, описанным выше для простых реакций, системы многоэтапных реакций ведут к дальнейшему образованию отходов через образование ненужных побочных продуктов во вторичных реакциях. Напомним способы минимизации образования побочных продуктов.
 - а) Тип реактора. Сначала необходимо удостовериться, что тип реактора правильно выбран для максимальной селективности данной реакции.
 - б) Концентрация реагентов. Селективность часто можно повысить следующими способами:

- Использовать избыток одного из реагентов, когда в реактор поступает более чем один поток питания.
- Повысить концентрацию инертного вещества, если побочная реакция является обратимой и протекает с уменьшением числа молей.
- Уменьшить концентрацию инертного вещества, если побочная реакция является обратимой и протекает с увеличением числа молей.
- Разделение промежуточных продуктов во время реакции, перед проведением дальнейших реакций и процессов разделения.
- Рециркуляция ненужных побочных продуктов в реактор, если реакции получения побочных продуктов обратимые.

Каждый из этих способов может в соответствующих обстоятельствах минимизировать отходы в реакторе.

- в) Температура и давление в реакторе. Если имеется значительное различие между влиянием температуры и давления на основную и побочную реакции, то температура и давление должны быть управляемыми для повышения селективности и минимизации отходов, образующихся из побочных продуктов.
- г) Катализаторы. Катализаторы могут оказывать решающее влияние на селективность реакций. Заменяя катализатор, можно оказывать влияние на основную и побочную реакции.
4. Уменьшение отходов за счет примесей в потоках реагентов. Если имеются примеси в потоках реагентов, это вызовет образование отходов от потока реагентов, продукта или от их обоих. Избежать образования таких отходов наиболее просто путем очистки потока реагентов. Таким образом, существуют экономические компромиссы между увеличением издержек (или затрат) на очистку потока реагента и уменьшением стоимости неочищенного сырья, стоимостью разделе-

ния продуктов реакции и стоимостью захоронения или обработки отходов (рис. 3.1.2).

5. Уменьшение отходов путем использования отходов побочных продуктов. Ненужные побочные продукты могут быть иногда использованы как полезные вещества, если их использовать в других реакциях в различных реакционных системах.
6. Уменьшение отходов катализатора. Можно использовать как гомогенные, так и гетерогенные катализаторы. В общем, гетерогенный катализатор должен быть применен всякий раз, как это возможно, так как разделение и рециркуляция гомогенного катализатора могут быть затруднены, что приведет к образованию новых отходов.

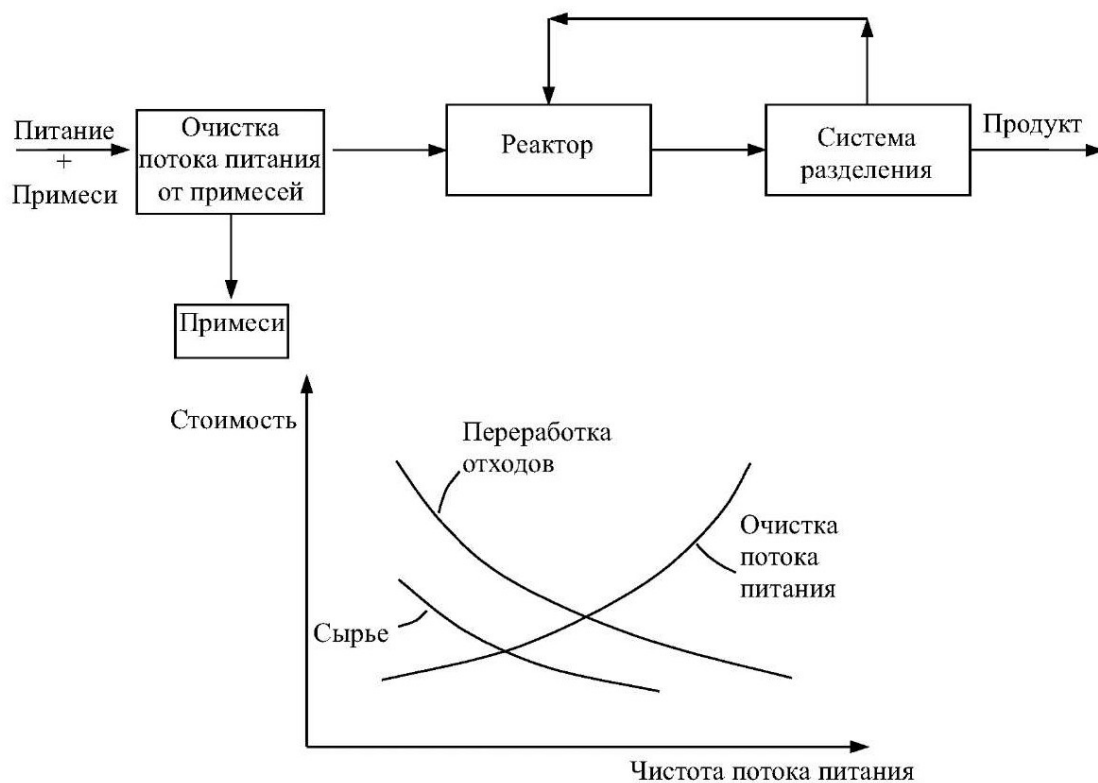


Рисунок 3.1.2. При очистке потока питания существует оптимум.

Гетерогенные катализаторы используются наиболее часто. Однако они стареют и требуют замены. Если загрязнения в потоке питания или в рецикле укорачивают жизнь катализатора, то оправдано дополнительное разделение, удаляющее эти загрязнения перед входом потока в реактор.

Если катализатор чувствителен к экстремальным условиям, таким как высокая температура, то избежать выжигания катализатора могут помочь следующие способы:

- лучшее распределение потока;
- лучшая теплопередача;
- ввод растворителя катализатора;
- лучшие контрольно–измерительные приборы и системы автоматического управления.

Каталитические реакторы с кипящим слоем имеют потери катализатора из–за трения твердых частиц, вызывая образование мелкодисперсного вещества, которое теряется.

Более эффективное разделение мелкодисперсных зерен катализатора от продуктов реакции и рециркулирование мелкодисперсных зерен будет уменьшать отходы катализатора до определенного уровня. Улучшение механической прочности катализатора является лучшим решением для уменьшения его отходов.

Минимизация отходов в системах разделения многокомпонентных смесей и системах рециркуляции

Отходы в ХТС могут быть минимизированы, если система разделения (СР) будет разработана более рационально таким образом, чтобы полезные вещества могли быть выделены и рециркулированы более эффективно.

Отходы систем разделения и систем рециркуляции можно минимизировать пятью способами.

- Непосредственное рециркулирование потоков отходов
- Устранение вспомогательных веществ, используемых в процессах разделения.
- Использование дополнительных процессов разделения потоков отходов для достижения высокой степени рекуперации
- Использование дополнительных реакций и процессов разделения для достижения высокой степени рекуперации

Эффективность воздействия каждого из указанных способов на минимизацию отходов будет варьироваться для различных ХТС.

1. *Непосредственное рециркулирование потоков отходов.*

Иногда отходы могут быть уменьшены непосредственной рециркуляцией отходов. Наиболее часто потоки отходов, которые могут быть непосредственно рециркулированы — это водные стоки, которые хотя и загрязнены, но могут заменить часть потока свежей технологической воды для ХТС. Иногда потоки отходов могут быть рециркулированы между различными ХТС. Потоки отходов одной ХТС могут стать исходным сырьем для другой ХТС. Если потоки отходов могут быть рециркулированы непосредственно, то это самый простой способ уменьшения отходов в ХТС. Чаще всего, тем не менее для уменьшения отходов требуется использовать дополнительные процессы или различные способы разделения.

2. *Очистка потока питания.*

Примеси, которые неизбежно входят в реактор вместе с потоком питания, дают отходы. Если потоки примесей не подверглись реакции, то они могут быть выделены из ХТС несколькими способами. Самый большой источник отходов получается, когда используют сдвукку. Примеси накапливаются в рецикле, и это положительное явление, так как накопление больших концентраций минимизирует отходы от потоков питания и продуктов реакций при сдвукке. Однако, два фактора лимитируют количество потока примесей, которое они могут достигать при накоплении:

- а) повышение концентрации инертного вещества может оказывать неблагоприятный эффект на эксплуатационные характеристики реактора;
- б) увеличение потока примесей в рецикле ведет к возрастанию затрат на системы рециркуляции (например за счет увеличения затрат на сжатие газа в рецикле и т.д.) до значения, при котором это повышение превышает экономию расхода, теряемую при очистке.

В общем, лучший способ уменьшения отходов из-за примесей в потоке питания — это очистка потока питания перед его входом в ХТС. Многие ХТС используют стадию окисления, для которой воздух является главным источником кислорода. К таким ХТС относятся, например, ХТС производства уксусной кислоты, ацетилена, акриловой кислоты, сажи, оксида этилена, формальдегида, малеинового ангидрида, азотной кислоты, диоксида титана, винилацетата и винилхлорида. Ясно, что так как азот воздуха не принимает участия в реакции, то он должен быть выделен в некоторой подсистеме ХТС. Так как разделение газов очень трудный процесс, азот обычно отделяется с использованием сдувки или альтернативно, в реакторе задается настолько высокая степень превращения, насколько возможно для исключения рециркуляции.

Если используется сдувка, то азот будет проходить через ХТС со всеми реагентами, включая потоки питания и продукты. В этом случае возможно потребуются очистка перед окончательным сбросом. Если воздух для окисления заменить на кислород, то в худшем случае, очистка будет самой малой.

3. Удаление вспомогательных веществ из процессов разделения.

Третий способ — это удаление вспомогательных веществ, введенных в ХТС для процессов разделения. Наиболее очевидным примером является добавление органического или водного растворителя. Также для осаждения различных веществ из растворов иногда используются кислоты или щелочи. В некоторых случаях эти вспомогательные вещества не могут быть рециркулированы. Если дело обстоит именно так, то отходы образуются при удалении этих веществ. Для уменьшения этих отходов необходимо использовать альтернативные способы разделения, как например, процессы выпаривания вместо процессов осаждения.

4. Дополнительные процессы разделения и рециркуляции.

Если способы непосредственной рециркуляции потоков, очистки примесей в потоке питания, а также исключения вспомогательных веществ, которые не могут быть рециркулированы, полностью исчерпаны, то необходимо применить четвертый способ минимизации отходов. Важно помнить, что, если поток отходов удаляется из ХТС, то любое ценное вещество теряется. Экономически возможно провести дополнительное разделение ценных веществ с целью их рециркуляции для дополнительной рекуперации вещества в ХТС, особенно важно учесть стоимость дальнейшей очистки потоков тяжелых фракций.

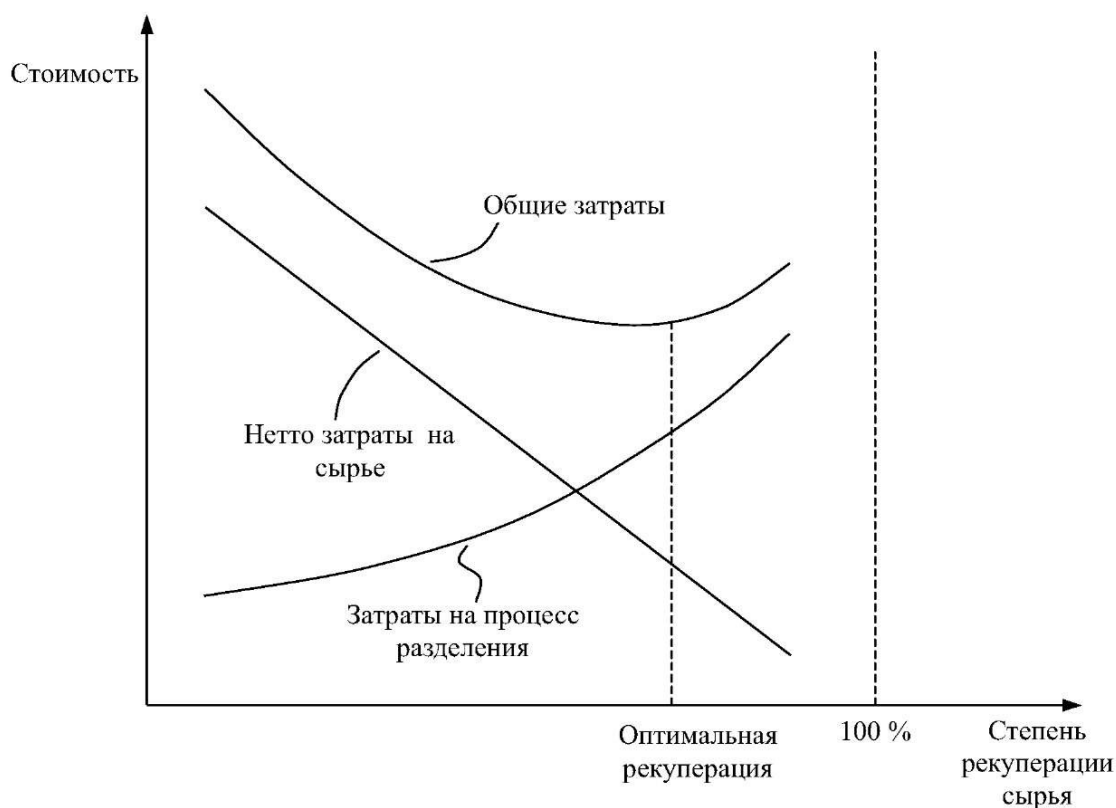


Рисунок 3.1.3. Затраты на переработку жидких отходов должны быть включены в стоимость сырья при расчете компромисса с затратами на процесс разделения, чтобы получить оптимальную степень рекуперации сырья.

Возможна наиболее экстремальная ситуация — сдвжка потока. Сдвжка используется для устранения из рецикла примесей потока питания и побочных продуктов реакции. В предыдущем разделе мы рассмотрели как

число аппаратов или стадий сдвухи может быть уменьшено при очистке потока питания от примесей. Однако, если это труднореализуемо или неэкономично, то уменьшать сдвуху примесей потока питания или сдвуху побочных продуктов реакции возможно за счет использования дополнительного разделения.

На рис. 3.1.3 показаны графики основного экономического компромисса. При частичном увеличении степени рекуперации вещества затраты на процессы разделения и систему рециркуляции увеличиваются. С другой стороны, стоимость потерь вещества уменьшается. Затраты на сырьё — это чистые затраты, которые означают, что затраты на потери вещества должны быть учтены одним из следующих способов:

- добавлением затрат на очистку отходов для нерекуперируемых веществ;
- вычитанием затрат на топливо, если рекуперированное вещество утилизируется сжиганием для получения полезного тепла в печи.

На рис. 3.1.3 показано, что экономический компромисс между затратами на разделение и чистыми (нетто) затратами на сырьё даёт экономически оптимальную степень рекуперации вещества. Возможно, что значительные изменения степени рекуперации вещества могут значительно влиять на величину других затрат, чем те, которые показаны на рис. 3.1.3 (например, стоимость реактора). Если дело обстоит именно таким образом, то это также можно включить в анализ экономического компромисса.

Необходимо подчеркнуть, что любые затраты на энергию для процессов разделения при анализе экономического компромисса, показанные на рис. 3.1.3, должны быть учтены при решении задачи оптимальной рекуперации теплоты и других энергоресурсов в ХТС. Оптимальные системы разделения должны наиболее полно рекуперировать теплоту, имеющуюся в ХТС.

5. *Дополнительная реакция и разделение потоков отходов.*

Иногда оказывается возможным проводить дополнительную реакцию, а также разделение потоков отходов.

Технологические и организационные способы минимизации отходов при эксплуатации ресурсосберегающих химико–технологических систем

Третьим источником отходов в ХТС после реактора, систем разделения и систем рециркулирования являются производственные, или эксплуатационные операции в ХТС.

1. Источники отходов от производственных операций

а) Пуск/останов непрерывных интегрированных ХТС.

- В реакторах степень превращения реагентов ниже проектных значений.
- Реакторы при неоптимальных условиях эксплуатации дополнительно производят нежелательные побочные продукты. Это может не только привести к потере вещества за счет образования побочных продуктов, но также может предотвратить рециркулирование вещества, образующегося при пуске ХТС.
- Разделители, работающие в неустановившихся режимах, производят промежуточные продукты, состав которых не допускает рециркулирования этих продуктов. Альтернативно, если промежуточный продукт не может быть рециркулирован, организация оптимального рецикла может дополнительно произвести нежелательные побочные продукты в реакторе.
- Образование промежуточных продуктов, которые не могут быть далее переработаны.
- При работе в нестационарных режимах разделители, которые отделяют полезное вещество от потока отходов, могут терять вещество, которое необязательно является отходом.
- Разделители, работающие в нестационарных режимах, производят продукты, которые не отвечают требованиям сбыта продукции.

б) Смена вида выпускаемых продуктов.

- В непрерывных ХТС при смене вида выпускаемых продуктов в многопродуктовых производствах источники отходов аналогичны источникам отходов, возникающих при пуске и останове ХТС.
 - И в периодических и в непрерывных ХТС может быть необходима очистка (промывка) оборудования. Чтобы предотвратить загрязнение нового продукта, вещества, используемые для очистки (промывки) оборудования, обычно не рециркулируются, а становятся отходами.
- в) Очистка (промывка) оборудования для технического обслуживания, наполнение емкостей и образование нестойких летучих выбросов.
- Оборудование необходимо очищать и обеспечивать его безопасность при техническом обслуживании.
 - Когда емкости ХТС, транспортные емкости или железнодорожные цистерны заполнены, вещество в виде пара в пустом объеме вытесняется из емкости и выбрасывается в атмосферу.
 - Транспортировка вещества в ХТС требует наличия трубопроводов, клапанов, насосов и компрессоров. Нестойкие летучие выбросы просачиваются через фланцы труб, сальники клапанов и изоляцию насосов и компрессоров.
2. Минимизация отходов при эксплуатации ХТС.
- Многие из проблем, связанных с образованием отходов от производственных операций, могут быть исключены, если ХТС спроектирована для небольших материально-технических запасов вещества. Это также совместимо с обеспечением технологической безопасности ХТС. Существуют и другие способы минимизации отходов от производственных операций.
- Минимизация числа аварийных ситуаций и обеспечение высокой готовности ХТС. Установка более надежного оборудования или резервного оборудования.

- Проектирование гибких непрерывных ХТС, которые могут перестраиваться при эксплуатации.
- Переход от периодических к непрерывным ХТС. Периодические ХТС, в силу своей природы, всегда находятся в нестационарном состоянии и, таким образом, для них затруднительна стабилизация оптимальных режимов.
- Установка достаточных промежуточных емкостей для возможности вторичной переработки материалов, не удовлетворяющих техническим условиям. Смена вида выпускаемых продуктов ведет к образованию отходов, потому что оборудование должно быть очищено перед производством следующего вида продукта. Такие отходы могут быть минимизированы за счет планирования расписания оптимальной смены продуктов.
- Создание систем сбора отходов от очистки оборудования и пробоотбора отходов, которые обеспечат возможность выделения отходов и рециркуляции отходов. Эти системы обычно требуют отдельных коллекторов для органических и водных стоков, сборных емкостей и систем рециркуляции, или систем разделения и рециркуляции, если это возможно. Если оборудование пропаривается при очистке, в ХТС необходимо предусматривать сбор и конденсацию паров и рециркуляцию вещества, если это возможно.
- Уменьшение потерь в виде нестойких летучих выбросов из емкостей.

Существует много других источников отходов в ХТС, связанных с производственными, или эксплуатационными, операциями, которые могут обнаруживаться только на дальнейших стадиях проектирования ХТС или после строительства предприятия и его пуска в эксплуатацию. Например, неоптимальные режимы эксплуатации означают, что ХТС работает при условиях, которые не были рассчитаны при проектировании, что ведет к

образованию отходов. Эти проблемы могут быть решены за счет повышения уровня автоматизации или улучшения систем управления ХТС.

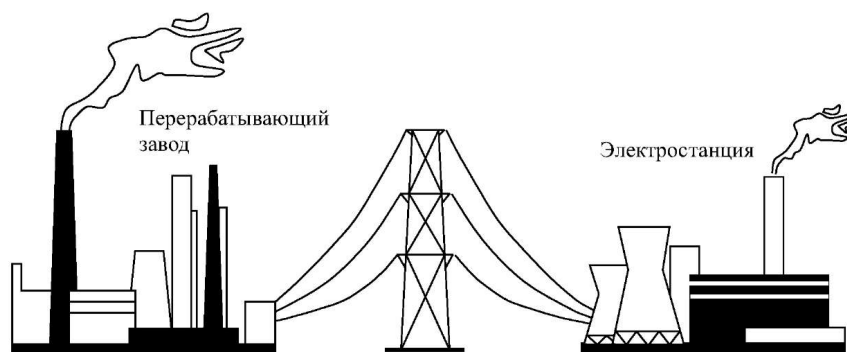
Минимизация отходов систем энергоснабжения

1. Система энергоснабжения как источник отходов.

Главные отходы в системе энергоснабжения связаны с горячими и холодными энергоносителями. Печи, паровые котлы, газовые турбины и дизельные двигатели производят отходы в виде продуктов сгорания. Основная проблема здесь — образование выбросов углекислого газа, окислов серы и азота, а также микрочастиц (окислов металлов, сажи и углеводородов). Кроме газообразных отходов при сжигании угля образуются твердые отходы в виде золы. Паровые системы и системы охлаждения воды также образуют водные стоки, что будет рассмотрено ниже.



а). Локальные выбросы



б). Глобальные выбросы

Рисунок 3.1.4. Локальные и глобальные выбросы.

Потоки отходов, образованные системами энергоснабжения, в целом менее вредны для окружающей среды, чем отходы ХТС. Однако недооценивать их нельзя. Хотя отходы энергоносителей менее вредны для окружающей среды, но их количество обычно больше количества отходов ХТС. Огромный объем отходов энергоносителей может оказать более негативное воздействие, чем отходы ХТС. Газы и продукты сгорания ведут к парниковому эффекту, кислотным дождям и могут представлять прямую опасность для здоровья из-за образования смога (рис. 3.1.1). Водные стоки, образуемые системами энергообеспечения, также могут создавать большие проблемы в случае, если они загрязнены.

2. Энергетическая эффективность (к.п.д.) ХТС.

Если в ХТС требуется использовать печи или паровые котлы для производства горячего энергоносителя, то любое чрезмерное использование потока горячего энергоносителя будет вести к излишним отходам энергоносителей с чрезмерным образованием углекислого газа, окислов серы, микрочастиц и т.д. Повышение степени рекуперации тепла будет уменьшать полную потребность ХТС в энергоносителях и, следовательно, уменьшать тепловые отходы.

3. Локальные и глобальные выбросы.

При рассмотрении отходов энергоносителей часто ограничиваются рассмотрением только локальных выбросов от ХТС и ее систем энергообеспечения (рис. 3.1.4). Однако это дает лишь часть общей картины загрязнения окружающей среды. Выбросы, образующиеся от центрального источника энергии, например, теплоэлектростанции (ТЭС), необходимо учитывать вместе с локальными выбросами, которые образуются в ХТС (рис. 3.1.4). Эти выбросы ТЭС должны быть включены в оценку количества отходов энергоносителей. Таким образом, глобальные выбросы для действующих ХТС определяются следующим образом:

$$\text{Глобальные выбросы} = \text{Выбросы от внутренних систем энергообеспечения ХТС} + \text{Выбросы от соответствующей центральной ТЭС с учетом потребляемого электричества} - \text{Выбросы, не произведенные на соответствующей центральной ТЭС, с учетом выработанной в ХТС энергии}$$

Это особенно важно при рассмотрении комбинированного производства энергии (пара и электричества).

4. **Комбинированное (совместное) производство тепла и электрической энергии.**

Комбинированное (совместное) производство электрической энергии и тепла может значительно повлиять на образование отходов энергоносителей. Однако требуется большая осторожность при правильной оценке этих эффектов. Оценка только локальных эффектов от установок комбинированного производства тепла и электроэнергии ошибочна. При комбинированном производстве электрической энергии повышаются локальные потери энергоносителей, т.е. локальные выбросы, потому что помимо топлива, сожженного для обеспечения тепла, нужно сжигать дополнительное топливо для получения энергии. Полная картина будет получена только, если глобальные выбросы рассматриваются с учетом выбросов из главного источника электроэнергии. Только в случае, если они рассматриваются таким образом, локальное объединение производства тепла и источника энергии может значительно уменьшить общие (глобальные) тепловые отходы. Причиной этого является то, что даже самые современные электростанции имеют низкий к.п.д. по сравнению с установками комбинированного производства теплоты и электричества. В качестве примера рассмотрим ХТС, в которой используются печи для получения потоков горячих энергоносителей.

Предположим, что это новейшая печь с тепловым к.п.д. 90%, которая производит 300 кг углекислого газа в час на каждый мегаватт тепла, подаваемого в ХТС. Электроэнергия в ХТС поступает от ТЭС по линии электропередач. Если вместо печи установить газовую турбину

производительностью 500 кг углекислого газа в час на мегаватт тепла, подаваемого в ХТС, то повышаются локальные выбросы отходов энергоносителей на 200 кг углекислого газа в час на мегаватт тепла. Однако газовая турбина также производит 400 кВт электроэнергии, и это позволяет исключить производство такого же количества электричества на ТЭС. Если та же электроэнергия была бы получена от ТЭС специально для питания печи, то 450 кг углекислого газа было бы выпущено из центральной электростанции, производя глобальный выброс в количестве 750 кг углекислого газа в час (печь вместе с электроэнергией, подаваемой по линии электропередач).

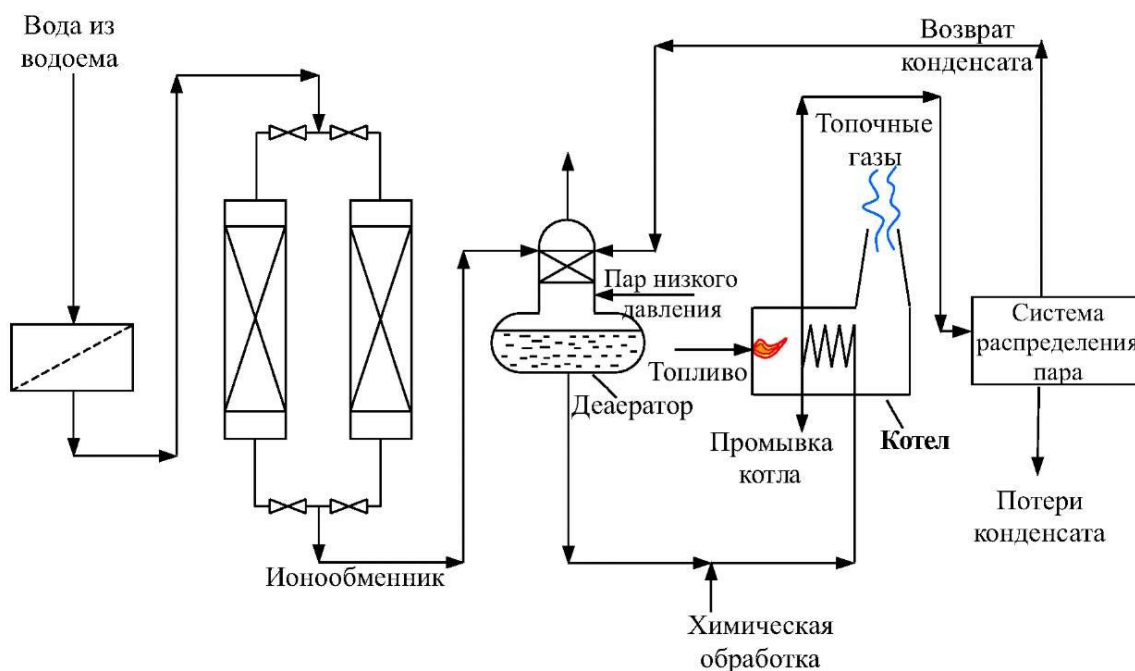


Рисунок 3.1.5. Упрощенная схема системы паропроизводства.

5. Выбор вида топлива.

Выбор вида топлива, используемого в печах и паровых котлах, существенно влияет на объем газовых отходов энергоносителей в виде продуктов сгорания. Например, переход от угля на природный газ в паровых котлах ХТС может привести к уменьшению выбросов углекислого газа примерно на 40% при том же количестве произведенного тепла. Это объясняется более низким содержанием углерода в при-

родном газе. Кроме того, вероятно, что переход от угля к природному газу также будет вести к значительному сокращению выбросов и окислов серы и азота. Таким образом, другой вид топлива хотя и будет уменьшать выбросы, но он может быть и более дорогим.

6. Отходы систем паропроизводства.

Если пар используется как горячий энергоноситель, то снижение эффективности системы паропроизводства вызывает увеличение отходов энергоносителей. На рис. 3.1.5 показана технологическая схема системы паропроизводства. Питание паровой системы осуществляется водой из рек или других водоемов. Вода обычно фильтруется, деионизируется в ионообменных установках и деаэрируется паром и подвергается химической очистке перед использованием в качестве питания парового котла.

Обычно генерируется пар высокого давления для дальнейшего использования в паровых турбинах для получения электроэнергии, перед его использованием для парового обогрева. Не весь паровой конденсат возвращается в котел. Эти постоянные потери конденсата в паровой системе ведут к тому, что в них должно быть постоянное поступление воды. Таким образом, основными отходами паровой системы являются:

- а) Стоки, образующиеся в аппаратах деионизации, когда работоспособность ионообменных аппаратов восстанавливается растворами кислоты или щелочи.
- б) Стоки, образующиеся от промывки котлов. Очистка питающей воды для котла необходима для предотвращения образования отложений нерастворимых солей, которые присутствуют в природной воде, но не были удалены в процессе деионизации. Промывка котла обычно требует от 2 до 10% от доли произведенного в котле пара, что зависит от качества воды, процессов водоочистки и процента возвращаемого конденсата. Главной проблемой промывки котла является то, что загрязненная вода обрабатывается химика-

тами. Для водоочистки добавляются кислород, фосфаты (для осаждения кальция, магния и т.д.) и полимерные дисперсанты (для поддержания дисперсного осаждения).

- в) Потери конденсата не создают больших проблем. Однако потери тепла, обусловленные потерями конденсата, в конечном счете должны быть покрыты за счет сжигания дополнительного топлива с образованием дополнительных продуктов сгорания. Эти источники отходов энергоносителей в паровых системах могут быть уменьшены за счет увеличения процента возвращаемого конденсата (в дополнение к уменьшению пара при увеличении рекуперации теплоты в ХТС).

7. Отходы систем охлаждения.

Системы охлаждения также образуют стоки. Большинство систем охлаждения использует рециркуляцию воды, а не однократное ее прохождение. Потери воды в рециркуляционных системах и в градирнях происходят главным образом из-за испарения, а также очень незначительные потери из-за брызгоуноса. Эти потери образуются из-за солей, содержащихся в природной воде. Потери при испарении в градирнях вызывают отложение этих солей. Образование солей предотвращается путем промывки градирен. Промывка градирен — источник большого объема стоков.

Системы водоохлаждения должны использовать ингибиторы коррозии, полимерные материалы, предотвращающие накопление солей, и биоциды, предотвращающие рост микроорганизмов.

Количество промывок градирен может быть уменьшено путем повышения энергетического к.п.д. ХТС, что уменьшает тепловую нагрузку градирен. В качестве альтернативы для системы водоохлаждения можно использовать аппараты воздушного охлаждения (АВО).

3.2. Общая характеристика современных технологических способов обработки отходов и очистки выбросов в химико–технологических системах

Технологические способы и аппараты сжигания отходов

Сжигание в печах — это важнейший практический способ переработки любых отходов ХТС. Наиболее целесообразно сжигать твердые и концентрированные отходы, а так же токсические отходы, содержащие галогенные соединения, пестициды, гербициды и т.д. Многие токсичные вещества не поддаются биологическому распаду, сохраняясь в окружающей природной среде длительный период времени. Если токсичные отходы не растворяются в воде, то наиболее эффективным способом их переработки является сжигание.

При сжигании токсичных веществ, таких как галогенные соединения, пестициды, гербициды и т.д. требуется поддерживать температуру 1100–1300°С при избытке кислорода. Газовые выбросы из дымовых труб печей для сжигания отходов ХТС в зависимости от вида сжигаемых отходов содержат различные кислотные газы, такие как хлористый водород, оксиды серы и азота. Для очистки этих выбросов от кислотных газов необходимо использовать газопромывающие аппараты, т.е. скрубберы. Этот способ газоочистки, в свою очередь, сопровождается образованием жидких отходов, т.е. сточных вод.

В зависимости от состава сжигаемых отходов для работы печи необходимо использовать вспомогательное топливо: мазут или природный газ.

Существует пять основных классов сжигательных печей:

1. Печи для сжигания жидких отходов.
2. Вращающиеся печи.
3. Камерные (подовые) сжигательные печи.
4. Печи с кипящим слоем.
5. Каталитические печи.

Способы рекуперации тепловых отходов, содержащихся в дымовых газах зависят от размещения печей. Сжигательные печи, расположенные непосредственно на производствах, где образуются отходы, обычно совмещают с системами рекуперации тепловых отходов (вторичных топливных энергоресурсов) и системами паропроизводства. Если печи сжигают бытовые отходы и находятся на значительном расстоянии от производителей отходов, то их не включают в систему рекуперации теплоты. В этом случае, дымовые газы охлаждаются перед очисткой и тепловые отходы используются для повторного нагревания дымовых газов после очистки для того, чтобы избежать образования видимых столбов пара из дымоходов.

Сжигание является наиболее предпочтительным способом переработки отходов с высококонцентрированными органическими примесями. Сжигание жидких отходов с низким содержанием органических примесей является дорогостоящим способом из-за необходимости использования дополнительного топлива. Слабые водные растворы органических веществ лучше перерабатывать способом мокрого (влажного) окисления.

Таблица 3.2.1. Классификация способов очистки газовых выбросов от твердых частиц.

| Оборудование | Основной механизм отделения частиц | Примерный размер частиц, μ |
|------------------------------|--|--------------------------------|
| Пылеуловительные аппараты | Гравитационные силы тяжести | >100 |
| Инерционные сепараторы | Сила инерции | >50 |
| Циклоны | Центробежная сила | >5 |
| Скрубберы | Сила инерции | >3 |
| Скруббер Вентури | Сила инерции | >0,3 |
| Мешочный фильтр | Просеивание | >0,1 |
| Электростатические осадители | Осаждение под действием электростатического притяжения | >0,001 |

Технологические способы и аппараты очистки газовых выбросов от твердых частиц

Выбор оборудования для очистки газовых выбросов от твердых частиц, выпускаемых в атмосферу, зависит от следующих факторов:

- размера частиц, которые необходимо отделить;
- веса и количества частиц;
- вида газа, содержащего твердые примеси;
- допустимого снижения давления;
- температуры.

Для очистки газовых выбросов от твердых частиц используются разнообразные способы, классификация которых дана в таблице 3.2.1.

Химико–технологические процессы и аппараты очистки газобразных выбросов

Основными газообразными загрязнителями, возникающими при работе ХТС, являются летучие органические соединения (*volatile organic compounds* — **VOCs**), сернистые газы (SO_x , H_2S), азотные соединения (NO_x , NH_3), галогены, диоксид (CO_2) и оксид углерода (CO). Наибольший объем этих газовых загрязнений в результате сжигания. Основные способы очистки газовых выбросов, возникающих не в процессах горения.

1. Конденсация.
2. Абсорбция.
3. Адсорбция.
4. Факельное сжигание.
5. Сжигание.

Технологические способы и аппараты очистки продуктов сжигания топлива

Основными продуктами сжигания топлива являются CO_2 , вода, SO_x , и NO_x . Образование продуктов сжигания наилучшим образом минимизируется при использовании в ХТС высокоэффективных теплообменных процессов и теплообменных систем (ТС), обеспечивающих рекуперацию внутренних топливных ресурсов ХТС.

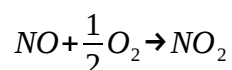
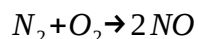
Кратко рассмотрим технологические способы снижения газовых выбросов от сжигания топлива.

1. **Образование выбросов CO_2 .** Если количество выбросов CO_2 рассматривать с точки зрения теплового эффекта, то существует только два пути его уменьшения:
 - **Увеличение энергетической эффективности.** Увеличение энергетической эффективности и ввод установок комбинированного производства энергии в ХТС резко уменьшает выбросы CO_2 . Отметим, что выбросы отходов энергоносителей должны рассматриваться в глобальном аспекте.
 - **Замена видов топлива.** Замена топлива с угля на природный газ уменьшает выброс CO_2 при том же самом количестве производимого тепла из-за более низкого содержания углерода в природном газе.
2. **Образование выбросов SO_x .** Если необходимо уменьшить выбросы SO_x , то можно использовать четыре способа, которые рассматриваются в следующей последовательности:
 - **Увеличение энергетической эффективности ХТС.** Увеличение энергетической эффективности ХТС уменьшает объем сжигаемого топлива и, следовательно, уменьшает выбросы SO_x из источника. Необходимо рассматривать глобальные выбросы отходов энергоносителей.
 - **Замена топлива.** Переход на топливо с более низким содержанием серы является очевидным решением.
 - **Десульфуризация топлива.** Большинство видов топлива могут быть очищены от соединений серы. Однако, если рассматривать газообразное, жидкое и твердое топливо, то трудность процесса десульфуризации различных видов топлива возрастает.
 - **Десульфуризация дымовых газов.** Существует целый ряд способов удаления SO_x из дымовых газов, таких как впрыскивание известняка в печь, абсорбция во влажном известняке после печи, аб-

сорбция водным раствором калия и многие другие. Однако основную проблему создают побочные продукты, образующиеся в процессах десульфуризации.

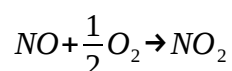
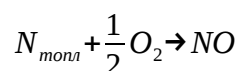
3. **Образование выбросов NO_x .** Существует две основные реакции образования оксидов NO_x .

а) Термический способ получения NO_x путем сжигания в кислороде воздуха:



Термический NO_x образуется при высоких температурах.

б) Топливный NO_x :



Топливный NO_x образуется как при низких, так и при высоких температурах. Однако, часть топливного азота непосредственно реагирует с образованием N_2 .

Кроме того, так же в различных реакциях образуются N_2O и N_2O_4 . Это то, что фактически не возможно учесть при расчете точного объема выбросов NO_x , образующихся в процессах реального горения.

Выбросы NO_x зависят не только от технологии сжигания, но также от объема и типа используемого топлива.

Существует пять способов уменьшения выбросов NO_x :

- **Увеличение энергетической эффективности.** Объем выбросов NO_x , так же как и в случае с выбросами CO_2 и SO_x , тем меньше, чем меньше сжигается топлива. Выбросы также должны рассматриваться в глобальном аспекте.
- **Замена топлива.** Поскольку образование NO_x зависит от вида топлива, замена на другое топливо может уменьшить образование NO_x . Общая тенденция такова, что по видам топлива: твердое—жидкое—га-

зообразное топливо, образование NO_x уменьшается. Однако, необходимо опять подчеркнуть, что образование NO_x сильно зависит от способов сжигания топлива.

- **Изменение конструкций горелок и числа стадий сжигания.** Уменьшение образования NO_x за счет создания топливно–воздушных смесей ведет к понижению максимальной температуры пламени. Возможен постадийный ввод топлива, ввод воздуха и ввод пара. Уменьшить объем выбросов на 50%–70% можно за счет изменения конструкции горелок.
- **Рециркуляция дымовых газов.** Рециркуляция части дымовых газов снижает максимальную температуру пламени, что уменьшает образование NO_x . Количество дымовых газов, которое может быть рециркулировано, не должно снижать устойчивость пламени. Рециркуляция дымовых газов позволяет уменьшить выбросы NO_x на 40%.
- **Химическое разложение.** Ввод аммиака уменьшает выбросы из–за разложения NO_x на азот и воду. Не смотря на то, что это разложение может быть осуществлено при высоких температурах без катализатора, наиболее часто вводят аммиак в дымовые газы с катализатором (обычно ванадий и/или олово с содержанием диоксида кремния SO_2).

Эти способы технически могут быть использованы как отдельно, так и в комбинации.

3.3. Классификация технологических процессов и аппаратов очистки водных стоков

Вначале рассмотрим водные стоки жидких органических веществ. Когда органические вещества сливаются в оборотную воду, начинают размножаться бактерии. Эти органические вещества могут быть окончательно окислены до устойчивых конечных продуктов. Молекулы углерода превращаются в CO_2 , водорода — в H_2O , азота — в NO_2 , серы — в SO_3 и т.д.

Количество кислорода, используемого в процессах разложения, называется *биохимическим потреблением кислорода* (БПК).

Несмотря на то, что тест на БПК хорошо показывает, как влияют сточные воды на окружающую среду, он требует для проведения 5 дней. Тест на *химическое потребление кислорода* (ХПК) может дать более быстрый результат. В тесте на ХПК используется окисление бихроматом калия ($K_2Cr_2O_7$).

Существуют также тесты на *общее потребление кислорода* (ОПК), в которых отходы окисляются в присутствии катализатора при температуре $900^{\circ}C$ в потоке воздуха.

Зависимость между величинами БПК, ХПК и ОПК для одних и тех же отходов располагается в порядке:

$$БПК < ХПК < ОПК$$

ХТС проектируются на основе данных о концентрациях веществ, тогда как системы очистки и обработки сточных вод проектируются с использованием данных БПК и ХПК. Таким образом, необходимо установить взаимосвязь между БПК, ХПК и концентрацией потока отходов, образующихся при эксплуатации ХТС. Без точных данных, эта взаимосвязь может быть установлена только приблизительно. Взаимосвязь между БПК и ХПК не так легко установить, учитывая различные виды веществ, которые окисляются. Усложняет проблему то, что многие отходы содержат сложные смеси окисляемых веществ, возможно вместе с химикатами, которые сдерживают окисление.

Если состав потока отходов известен, тогда *теоретическое потребление кислорода* (ТПК) может быть рассчитано из соответствующих стехиометрических уравнений.

На первом этапе приближений можно допустить, что теоретическое потребление кислорода будет эквивалентна величине ХПК. Так, эксперимент с бытовыми коммунальными сточными водами показывает, что среднее соотношение между величинами ХПК и БПК составляет порядка 1,5–2.

Выделяют три класса способов очистки и обработки водных стоков:

- первичные (или предварительная обработка);
- вторичные (или биологическая обработка);

- третичные (окончательная обработка).

Первичная обработка водяных стоков предшествует биологической обработке, которая включает в зависимости от природы примесей как физическую, так и химическую обработку.

1. Способы первичной обработки (или предварительной переработки).

ХТП первичной обработки служат двум целям:

- Извлечение полезных веществ, где это возможно.
- Подготовка водных стоков для биологической очистки путем удаления избыточного количества или сточных вод или компонентов, которые замедляют биологические процессы.
- Извлечение полезных веществ, где это возможно.
- Подготовка водных стоков для биологической очистки путем удаления избыточного количества или сточных вод или компонентов, которые замедляют биологические процессы.

ХТП предварительной обработки будут наиболее эффективными, когда они применяются для индивидуальных стоков отдельных ХТП или стадий ХТС перед тем, как потоки сточных вод смешиваются для биологической обработки.

Капитальные затраты для большинства процессов обработки водных стоков пропорциональны общему количеству стоков, а эксплуатационные затраты увеличиваются с уменьшением концентрации, до которой необходимо довести содержание загрязнителя.

Таким образом, если двум потокам требуются различные процессы обработки, то не имеет смысла смешивать их и обрабатывать оба потока одновременно. Это увеличивает как капитальные, так и эксплуатационные затраты. Вместо этого, потоки следует разделить и обрабатывать отдельно в системе переработки отходов. В самом деле, эффективная начальная обработка стоков приводит к тому, что некоторым потокам вовсе не потребуется биологическая очистка.

В настоящее время используют существующие способы первичной обработки стоков:

- a. Отделение твердых частиц.
- b. Коалесценция.
- c. Флотация.
- d. Химическое осаждение.
- e. Химическое окисление.
- f. Мокрое окисление.
- g. Адсорбция.
- h. Мембранные процессы.
- i. Ионообменные процессы.
- j. Жидкостная экстракция.
- k. Паровая десорбция.
- l. Выпаривание.
- m. Изменение кислотности.

2. **Вторичная или биологическая обработка** используется для разрушения органического вещества, которое превращается в твердые отходы. На больших химических предприятиях возникает потребность в создании собственных систем биологической очистки. Небольшие заводы могут использовать местные муниципальные системы очистки, которые обрабатывают смесь промышленных и бытовых стоков.

Существует два основных типа биологических реакций — аэробные и анаэробные, используемые для вторичной обработки сточных вод.

Во всех типах биологической обработки, от избытка произведенного активного ила обычно избавляются. Обработка и хранение активного ила является одной из главных проблем, связанных с большими затратами. Анаэробные процессы имеют здесь преимущество, поскольку они производят значительно меньше активного ила (порядка 5% от аэробных процессов на обработку одного и того же количества вещества).

Хранение активного ила обычно составляет от 25 до 40% эксплуатационных расходов системы биологической обработки. Обработка активного

ила изначально нацелена на уменьшение его объема. Это необходимо из-за того, что активный ил состоит обычно на 95–99% из воды и стоимость хранения тесно связана с его объемом.

Таблица 3.3.1. Сравнение аэробных и анаэробных методов обработки водных отходов.

| Аэробные | Анаэробные |
|--|--|
| БПК < 1000 мг/л | БПК > 1000 мг/л |
| Стабильные конечные продукты (CO_2 , H_2O , и т.д.) | Нестабильные конечные продукты (CH_4 , H_2S , и т.д.) |
| БПК уменьшается до 95% | БПК уменьшается до 75–85% |
| Высокое образование ила | Низкое образование ила |

В таблице 3.3.1 отражены основные важнейшие характеристики аэробной и анаэробной обработки водных отходов. Обычно в процессах аэробной обработки БПК может достигать значений менее 1000 мг/л, если не используется чистый кислород для аэрации.

3. **Третичная обработка**, или окончательная обработка, подготавливает водные стоки для конечного сброса. Конечное качество водных стоков зависит от природы источника и забираемой воды. В таблице 3.3.2 приведены составы вероятных стоков для типовых источников забираемой в ХТС воды.

Таблица 3.3.2. Зависимость качества стоков от типа забираемой воды.

| Источник забираемой воды | Состав вероятных стоков | |
|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| | БПК, (мг/л) | Взвешенные частицы, (мг/л) |
| Поток приливного устья рек | 150 | 150 |
| Равнинные реки | 20 | 30 |
| Горные реки | 10 | 10 |
| Очень чистые реки | 5 | 5 |

В третичной обработке сточных вод используются следующие процессы:

- а. Фильтрация.
- б. Ультрафильтрация.
- с. Адсорбция.

d. Удаление азота и фосфора.

e. Дезинфекция.

После рассмотрения методов обработки сточных вод, становится ясно, что часто ключевая проблема удаления отходов не решается радикально. Эти методы лишь перемещают отходы из одной подсистемы в другую. Основная проблема состоит в том, что как только возникают отходы, их невозможно уничтожить. Отходы можно концентрировать и растворять, их физическая и химическая формы могут быть изменены, но их невозможно уничтожить.

Если при используемом технологическом способе обработки отходов образуются вещества, которые можно рециркулировать, то проблема отходов действительно успешно решена. Однако если способ обработки просто концентрирует отходы, (образуются концентрированные жидкости, шламы, суспензии, или твердые вещества), которые не могут быть рециркулированы, тогда эти отходы необходимо направлять в отвалы. Становится все более недопустимым захоронение подобных отходов на свалках. При сжигании отходов образуются загрязнения в виде продуктов сгорания, и дополнительные жидкие стоки из газоочистительных систем.

Таким образом, для успешной реализации перехода к устойчивому развитию наилучшими стратегиями борьбы с отходами и выбросами проектируемых и действующих ХТС является: стратегия минимизации отходов, которая предотвращает образование отходов внутри ХТС; стратегия разработки ресурсосберегающих экологически безопасных ХТС, основанных на использовании термодинамических пинч-методов и эвристическо-декомпозиционных методов синтеза ресурсосберегающих ХТС.

3.4. Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии очистки стоков гальванических производств

В результате технологических процессов гальванохимической обработки металлических деталей и изделий образуется значительное количе-

ство жидких высокотоксичных отходов, состоящих из промывных вод и отработанных технологических растворов.

Промывные воды по объему составляют 90–95% сточных вод, отработанные растворы 5–10% соответственно, по содержанию вредных токсичных веществ отработанные растворы составляют 60–70%. По объему сброса сточных вод гальванические предприятия можно разделить на три группы: крупные предприятия — 100–300 м³/ч; средние предприятия — 20–100 м³/ч, мелкие предприятия — до 20 м³/ч.

На основе проведенных в 1996 г. обследований 300 гальванических цехов г. Москвы и анализа полученной информации определены основные виды сточных вод, их усредненный состав, концентрации загрязняющих веществ, и разработаны типовые технологические решения по очистке сточных вод до норм ПДК г. Москвы, а так же по возврату воды от 70 до 95% в технологический процесс.

Проведенные научные исследования показали, что 60–70% сточных вод формируют кислотно-щелочной сток в состав которого входят серная, азотная, фосфорная кислота, щелочь, соли металлов меди, цинка, никеля, алюминия, железа, кадмия, органические добавки, используемые в электролитах, а также масла, СОЖ, попадаемые при поступлении изделий из механического цеха.

Второй поток сточных вод формирует электролиты содержащие соединения хрома (хромсодержащие сточные воды), в состав которого входит соединение хрома (VI) и хрома (III), а также серная кислота, соли цинка, железа, кадмия, меди, амония. Объем сточных вод данного состава составляет 20–30%.

Третий поток сточных вод формируют электролиты, содержащие соединения циана и солей металлов меди, цинка, кадмия (циан-содержащий сток). Объем высокотоксичного стока около 10%.

Для повышения эффективности очистки всех трех потоков очистки сточных вод предложен комплексный подход, который включает решение следующих задач: усреднение потоков, корректировка сточных вод по рН,

отделение дисперсной фазы, содержащей осадки металлов, глубокая очистка воды до норм ПДК, обессоливание воды для возврата в технологический цикл. Для потока сточных вод, содержащего хром (VI) дополнительно предусматривается стадия восстановления хрома (VI) до хрома (IV). Для потока, содержащего соединения циана дополнительно предусматривается стадия окисления циана до безопасных продуктов двуокиси углерода.

Проведенные научные исследования показали, что решение задач отмеченных выше, возможно с использованием различных технологий и оборудования. Специалистами Технопарка «Экохимбизнес 2000+» РХТУ им. Д.И. Менделеева создана база данных «WAAM», включающая более 300 единиц оборудования используемого для очистки сточных вод.

Технико-экономический анализ показал, что наиболее эффективными технологиями для очистки указанных сточных вод являются физико-химические методы. Наиболее высокоэффективным оборудованием являются электромембранные, мембранные и электрофлотационные аппараты и новых технологии их использования. Разработаны два основных подхода использования новых инновационных технологий водоочистки.

Первый используется при реконструкции действующих гальванических цехов, имеющих очистные сооружений. В этом случае используются традиционные методы (реагентные) с добавлением на последней стадии разработанного в РХТУ электрохимического модуля глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов.

Электрохимический модуль глубокой очистки сточных вод от ионов тяжелых цветных металлов состоит из электрофлотатора с нерастворимыми электродами, емкости для реагентов, камеры фосфатирования, насосов, источника постоянного тока 100–150 А и напряжением 20–30 В, системы сбора флотошлама.

Модуль обеспечивает глубокую очистку после реагентного метода, электрокоагуляции, электролиза при начальной концентрации ионов цветных металлов в сточных водах 1–10 мг/л.

Модуль применим к очистке как локальных технологических линий, так и для обработки стоков смешанного состава и обеспечивает очистку до 10 м³/ч. Установка обеспечивает извлечение ионов Cu^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} и т.д. из сточных вод гальванопроизводства, производства печатных плат, в любом соотношении этих ионов в присутствии различных анионов.

Остаточная концентрация ионов цветных металлов:

- Cu , Ni — не более 0,01 мг/л;
- Cd , Pb — не более 0,005 мг/л;
- $Cr(III)$ — 0,01 мг/л;
- $Cr(VI)$ — отсутствие;
- $Fe(II)$, $Fe(III)$, $Al(III)$ — 0,05 мг/л;
- дисперсные вещества — 0,5–1 мг/л.

Установка позволяет дополнительно извлекать ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и эффективно удалять жиры, масла, дисперсные частицы органического происхождения (например щелочной фоторезист).

Расход электроэнергии 0,5–1 кВт·ч/м³. Производительность модуля до 10 м³/ч. Размеры электрофлотатора 2000x1200x1115 мм. Напряжение на установке 20–30 В; ток до 100 А. Срок службы: оксидного покрытия анодного блока 3–5 лет, титановой основы — 10 лет.

Нестандартное оборудование модуля выпускается на промышленных предприятиях России, Белоруссии, Украины, США, Италии, Канады.

Второй подход используется при строительстве новых цехов, участков или в том случае, когда система очистки сточных вод отсутствует на действующем предприятии.

В этом случае используется технология электрофлотомембранной очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов до концентрации 0,5–1 мг/л и дополнительная доочистки сточной воды на ультрафильтрационном блоке до норм ПДК 0,05–0,01 мг/л. Для возврата воды в технологический цикл от 70 до 95% используются установки обратн осмотические установки, позволяющие удалять из воды минеральные соли в первую очередь, хлориды, сульфаты натрия.

Предложенные технические решения за последние 10 лет реализованы более, чем на 20 промышленных предприятиях, имеющих гальванические производства.

В настоящее время создано новое научное направление — электрофлотационные, электромембранные процессы разделения, концентрирования и извлечения неорганических и органических дисперсных соединений, эмульсий из водных сред и растворов электролитов.

Развиты теоретические представления о важной роли межфазных явлений на границе раздела газ–дисперсная фаза–водный раствор в электрофлотационном процессе концентрирования гидрофильной фазы на границе раздела воздух–раствор.

Установлены новые закономерности электрофлотационного извлечения дисперсных неорганических соединений гидроксидов, карбонатов, фосфатов, сульфидов, оксидов, таких металлов как: медь, никель, цинк, кадмий, железо, алюминий, хром, свинец, а также некоторых дисперсных соединений органической природы на основе полимерных композиций (фоторезист, пленкообразующие составы, красители и др.), биотехнологические компоненты (белок, жиры, масла).

Установлены новые закономерности электрофлотационного извлечения эмульсий нефтепродуктов (бензинов, масел, дизельного топлива) из водных сред и растворов электролитов. Показана важная роль факторов влияющих на границу раздела газ–эмульсия–раствор на эффективность процесса.

На базе фундаментальных исследований электрофлотационных и электромембранных процессов созданы новые современные высокоэффективные технологии и установки для очистки сточных вод промышленных предприятий от высокотоксичных загрязняющих веществ (ионы тяжелых металлов, нефтепродукты, красители, полимерные композиции, биосистемы и др.).

Глава 4. Цифровизация и интенсификация энергоресурсосберегающих химико–технологических систем

4.1. Сущность концепции промышленной революции «Индустрия 4.0»

Понятие «Четвертая промышленная революция» – **«Индустрия 4.0»** впервые введено в 2011 г. Федеральным правительством ФРГ в стратегической программе энергоресурсоэффективного развития немецкой промышленности, основанной благодаря широкому использованию INTERNET, ЭВМ и средств информационно–коммуникационных технологий (ИКТ) на создании **единого информационного пространства** промышленных систем и информационно–коммуникационных систем, что обеспечивает их взаимодействие между собой без непосредственного участия человека.

Документы «Индустрия 4.0» использованы в проекте повышения конкурентоспособности обрабатывающей промышленности ФРГ. Специалисты предложили интегрировать в промышленные процессы так называемые «киберфизические системы» (CPS), или автоматизированные машины и обрабатывающие центры, подключенные к ИНТЕРНЕТУ. Ставится цель создать такие системы, которые позволили бы машинам самостоятельно (автономно) изменять при необходимости производственные шаблоны. Цифровизация (основывается на ИНТЕРНЕТЕ) охватывает все этапы жизненного цикла предприятия и продукта, включая инжиниринг и создание прототипа, наладку и обслуживание производственной линии, контроль и оптимизацию производства, а также данные, полученные в результате обратной связи от клиентов и потребителей. «Индустрия 4.0» меняет в корне не только процесс производства, но и сферу услуг, связанных с выпускаемой продукцией.

Первая промышленная революция началась с изобретения парового двигателя и на протяжении XVIII–XIX веков создала первичную индустри-

ализацию в Европе. Эта классическая революция связана и с инновационными промышленными технологиями — прядение нити из хлопка и использование кокса в металлургии.

Вторая промышленная революция произошла в начале XX века с появлением электричества, а также основана на изобретении Фордом конвейера, благодаря которому удалось не только создать массовый рынок, но и сделать доступным автомобиль.

Третья промышленная революция началась в конце 1960-х годов, когда стали широко применяться компьютеры, получило развитие числовое программное управление (ЧПУ) и созданы микропроцессоры, а позже — промышленные роботы. В этот период бурно развивалась химическая, нефтеперерабатывающая и нефтегазохимическая промышленность.

Таким образом, основу любой промышленной революции образуют три основных составляющих:

- сырье, а также источники и способы передачи энергии;
- промышленные технологии;
- организация производства и управление.

Для первой промышленной революции начала 1780-х годов главным сырьем были уголь и железо, главной технологией — пар и преобразования тепловой энергии в механическую. Механизация и организация управления, как таковые, практически отсутствовали.

Во второй половине XIX начале XX века с появлением электричества открылись возможности для начала работ по научной организации труда, появились конвейеры, идеи тейлоризма. Несколько позже появились работы по теории автоматического управления и различного рода табуляторам—вычислителям.

Для третьей промышленной революции характерно использование средств информационно—вычислительной техники и автоматизированных систем управления.

Концепция четвертой промышленной революции базируется на следующих принципах:

- функциональная совместимость человека и машины на основе создания человеко–машинных систем – возможностью взаимодействия напрямую через ИНТЕРНЕТ;
- сбор и обработка больших массивов данных;
- прозрачность информации и способность создавать цифровые двойники или цифровые виртуальные копии физического мира;
- техническая помощь машин человеку – объединения больших объемов данных и выполнения ряда небезопасных для человека задач;
- способность цифровых систем на основе теории искусственного интеллекта самостоятельно и автономно принимать решения.

Главная концепция Индустрии 4.0 – ориентированное на конкретного потребителя(клиентоориентированное) проектирование, производство и эксплуатация продукции на базе проникновения ИКТ во все сферы деятельности промышленных предприятий и во все взаимоотношения с внешней средой в цепи поставок предприятия. Данная концепция изменяет как существующие способы управления производством, так и взаимоотношения в цепи поставок с потребителем продукции и создают индивидуальное цифровизированное производство с высокой скоростью выполнения заказа при низких издержках, близких издержкам массового, или серийного, производства.

Одним из следствий реализации данной концепции может быть выгодное как для производителя, так и для потребителя следующее изменение их взаимоотношений во всей цепи поставок потребителя вместо продажи/покупки продукции осуществляется ее передача от производителя заказчику на основе аренды с платой периодическими расчетами по арендным счетам за выполняемое производителем ее использование и эксплуатационное обслуживание.

Концепция «Индустрия 4.0» включает в себя следующие Компоненты развития систем автоматизации предприятия, определяемые внедряемой цифровизированной структурой предприятия:

- *промышленный ИНТЕРНЕТ (Industrial Internet)* – ИНТЕРНЕТ, информационно объединяющий все стадии и подразделения предприятия, формирующий единую ИКТ – инфраструктуру предприятия и реализующий её информационную интеграцию с другими, взаимосвязанными в цепи поставок предприятиями, потребностями и клиентами;
- *Интернет вещей (Internet of Things, IoT)* – структура взаимодействий различных физических единиц оборудования и подразделений предприятия без непосредственного участия человека, формирующая информационные связи между ними и совместную реализацию функций;
- *Обработка больших данных (Big Data Mining)* – термин, под которым понимается получение, обработка, аналитические преобразования больших объемов разнородных, частично неструктурированных данных, получаемых от различных объектов, взаимодействующих в реализованной структуре Интернета вещей;
- *Цифровое предприятие ИКТ (Digital Enterprise or Manufacture)* – предприятие со сквозной информационной взаимосвязанностью всех подразделений, имеющие единую ИКТ–инфраструктуру, а также использующее новые автоматизированные методы контроля и интеллектуального управления функционированием предприятия, а также новые автоматизированные взаимосвязанные отношения с необходимыми предприятиями и со своими потребителями в цепи поставок.

При инжиниринге аппаратно–технического и программно–информационного обеспечения различных систем поддержки принятия решений (СППР) и АСУ цифрового предприятия широко используются системы искусственного интеллекта, робото–кибернетические системы и системы виртуальной реальности.

В Российской Федерации в ответ на концепцию «Индустрия 4.0» в 2014 году Правительством РФ совместно с экспертным сообществом, в которое входят Российская Академия Наук и Агентство стратегических инициатив по продвижению новых проектов (АСИ), разработана национальная программа «Национальная Технологическая Инициатива» (НТИ). Реализация

программы НТИ осуществляется на основе объединения экспертных сообществ с представителями бизнеса и государственных корпораций, т.е. на основе частно–государственного партнерства, для развития в России перспективных глобальных высокотехнологичных рынков и отраслей, которые могут стать основой развития мировой наукоёмкой экономики, или экономики знаний (knowledge economy) в условиях цифровой экономики.

Реализация НТИ осуществляется через создание сетевых мегапроектов «ТехНет» («промышленность»), «АэроНет» («воздушный транспорт»), «АвтоНет» («Автомобильный транспорт»), «МариНет» («морской транспорт»), «НейроНет» («нейротехнологии»), «ХэлНет» («медицина»), «ФудНет» («пища»), «Энерджи» («энергетика»), «СейфНет» («безопасность»).

Цель мегапроектов НТИ создать в указанных выше отраслях инновационные отечественные глобально конкурентноспособные кампании, которые будут на мировом рынке к 2030 году обеспечивать отраслевой объём продаж продукции не менее 100 млрд. долл. США.

4.2. Методика инжиниринга цифрового химического предприятия

Основным результатом практической реализации концепции «Индустрия 4.0» в химической промышленности является инжиниринг и эксплуатация цифровых химических предприятий (ЦХП). Основными направлениями инжиниринга ЦХП является обеспечение:

- компьютеризации (computerization),
- цифровизации (digitalization),
- сетевого взаимодействия (connection),
- визуализируемость (visualization),
- прозрачности (transparency),
- прогнозируемости (predictability),
- адаптивности (adaptability)

на всех этапах жизненного цикла предприятия и готовой продукции.

Кратко рассмотрим сущность этих основных направлений инжиниринга ЦХП. Компьютеризация и цифровизация подразумевают широкое использование ЭВМ, INTERNET и различных современных аппаратурно-технических средств цифрового (компьютеризированного) управления во всех основных подразделениях (агрегаты, установки, цеха, отделы и др.)

Сетевое взаимодействие обеспечивает создание **единой информационной среды** на всех этапах жизненного цикла производства и потребления промышленной продукции с применением взаимодействующих систем интегрированной информационно-логистической поддержки – **CALS**, систем автоматизированного проектирования и уравнивания – **CAD/CAM**, систем автоматизированного оперативного управления предприятием **MES** (Manufacturing Execution Systems), систем планирования и управления ресурсами предприятия – **ERP**, систем управления цепями поставок – **SCM**, систем сбора и обработки больших массивов данных (**Big Data Mining**), систем интерактивной аналитической обработки данных – **OLAP** и др.

Визуализируемость – возможность создания цифрового многофакторного отображения различных массивов данных, создания **цифровых двойников (digital twin)** промышленных объектов;

Прозрачность – обеспечение доступности к многофакторной информации различным подразделениям предприятия и участниками цепи поставок предприятия;

Прогнозирование – возможность научно-обоснованного предсказания достоверных решений;

Адаптируемость – возможность приспособления к различным внешним воздействиям и быстрого реагирования на различные изменения.

Сети передачи больших массивов данных должны обеспечивать надежность взаимодействия подразделений и высокую кибербезопасность ЦХП за счет выполнения следующих функций:

- шифрование для обеспечения конфиденциальности данных и предотвращения несанкционированного доступа;
- доступ к сетям только санкционированных устройств;

- аутентификация пользователей при предоставлении им доступа к сети.

Эти функции обеспечивают доступность к данным для проверенных пользователей и санкционированного оборудования в любой момент времени, конфиденциальность доступа к данным и предотвращение несанкционированного доступа, целостность и подлинность данных и их подотчетность путем идентификации всех транзакций в сетях. Средства сетевой диагностики позволяют анализировать сетевой трафик, выделять подозрительную сетевую активность и своевременно предпринимать регламентированные воздействия.

Один из важнейших аспектов обеспечения надежности работы ЦХП – резервирование каналов связи и автоматическое перестроение сети передачи данных в случае ошибки. Коммуникационную сеть ЦХП проектируют с возможностью автоматического перестроения топологии и/или перенаправления трафика по альтернативному каналу в случае возникновения ошибки. Для этого существуют протоколы резервирования каналов и сетей. Так, например, протоколы параллельного резервирования **PRP (Parallel Redundancy Protocol)** и бесшовного резервирования **HSR (High Availability Seamless Ring)** одновременно используют два независимых канала доставки данных, что приводит к отсутствию времени переключения на другой канал и связанному с этим перерывом в передаче данных. В них существует механизм постоянного мониторинга всех каналов с целью перенаправления трафика по запасному каналу в случае обнаружения ошибки в активном канале.

Общие тенденции развития традиционных АСУ производством (рис. 2.4.1) на пути к созданию ЦХП:

- переход на общую цифровую структуру контрольных, учетных, управляющих данных, что способствует внедрению промышленного Интернета вещей;

- увеличение объема, точности, надежности исходных данных и расширение числа источников их получения, что приводит к более рациональной и реактивной выработке управляющих решений;
- применение дистанционного, удалённого контроля и управления отдельными переделами производства, снимающее пространственные ограничения на расположения отдельных участков предприятия;
- развитие сквозных управляющих решений для всех производственных подразделений и служб, приводящих к интегрированному управлению производством;
- снижение числа нештатных ситуаций и аварийных событий благодаря своевременному выявлению в исторической базе данных аналогичных или близких изменениям в контрольных данных, что позволяет предсказать развитие возникающих отклонений в работе производства;
- повышение квалификации персонала, использующего и обслуживающего средства и системы автоматизации, поскольку без решения этих кадровых проблем невозможно обеспечить новые формы работы подразделений ЦХП.

Практическая реализация концепции Индустрия 4.0 на химических предприятиях имеет свои принципиальные отличия от предприятий машиностроения, обусловленные рядом (вещества и материалы):

- у химических предприятий нет продукции типа оборудования или машин, которую они могли бы сопровождать в процессе ее эксплуатации, т.е. они не имеют влияния на эксплуатацию своей продукции (вещества и материалы);
- индивидуальное производство с выпуском продукции на конкретный заказ для химических предприятий имеет достаточно ограниченный характер;
- на предприятиях перерабатывающих технологических отраслей содержание и формы контроля, учета и управления производством и

его отдельными переделами отличны от содержания и форм этих функций в машиностроительных предприятиях.

Важное место систем автоматизации производственных объектов в реализации концепции Индустрия 4.0 обусловлено тем, что только они являются источниками всех оперативных данных о работе производства для всех подразделений цифрового предприятия и только через них службы и отделы предприятия могут целенаправленно воздействовать, изменять ход работы производства. Для того чтобы соответствовать требованиям концепции Индустрия 4.0 необходима значительная модернизация и расширение функций систем автоматизированного управления производственными объектами и, главное, иерархических систем автоматизации предприятия и цепей поставок.

4.3. Роль корпоративных информационных систем в обеспечении энергоресурсоэффективности цифровизированных химических предприятий

Комплексная (корпоративная) информационная система (КИС) цифрового химического предприятия представляет совокупность четырех видов автоматизированных систем, которые осуществляют управление технологическими режимами, организационно–управленческой деятельностью на предприятиях и в цепи поставок предприятия от сбора больших массивов данных о поставках сырья, технологических данных о функционировании ХТП и ХТС до бизнес–процессов контроля выполнения заказов на продукцию. КИС (рис. 2.4.1) управляет всеми логистическими операциями в цепи поставок предприятия.

Первый уровень КИС – это системы супервизорного управления, сбора и накопления данных (**SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition**), которые осуществляют сбор данных и управление режимами функционирования ХТП и ХТС.

SCADA системы объединяют различные автоматизированные системы учёта и управления (АСУ ТП – автоматизированная система управления

технологическим процессом, АСУ Э – автоматизированная система управления электроснабжением, АСКУЭ – автоматизированная система коммерческого учёта энергоресурсов). Их задача – сбор и первичная обработка данных о ХТП и ресурсах предприятия, а также обеспечение диспетчерского контроля и управления оборудованием.

Второй уровень КИС – это производственные исполнительные системы, или системы управления производственными процессами (**MES – manufacturing execution system**). Их предназначение – решение задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции. Также к этим системам относят программное обеспечение для планирования ремонтных работ, поддержания складского резерва запасных частей и управления персоналом, выполняющим сервисное обслуживание.

Третий уровень КИС – это системы управления ресурсами предприятия (**ERP – enterprise resource planning**). Системы данного уровня выполняют управление финансовыми ресурсами предприятия, отслеживают запасы материалов, управляют трудовыми ресурсами предприятия. Также они предназначены для поддержки среднесрочного и стратегического планирования деятельности предприятия.

Иерархическая архитектура современных логистических систем управления цепями поставок **SCM** – систем включает следующие взаимосвязанные системы управления: Logistics, Product Lifecycle Management, Supply Chain Planning, Procurement, Order Management, Manufacturing, Maintenance Management, Приложение Internet of Things.

Рассмотрим краткую характеристику этих функциональных систем.

Комплексный, полностью унифицированный пакет облачных решений систем управления цепями поставок включает следующие модули:

- **Logistics** – Логистический SCM модуль управляет всеми складскими операциями и режимами транспортировки внутри страны и за ее пределами для сокращения расходов, увеличения эффективности и обеспечения нормативного соответствия.

- **Product Lifecycle Management** – Система управления жизненным циклом продукта дает возможность внедрять инновации, производить разработку и извлекать прибыль из качественных продуктов.
- **Supply Chain Planning** – Система для планирования ЦП помогает работать на опережение на рынках за счет проактивной разработки стратегий роста дохода и сокращения издержек—и их последовательной реализации в соответствии с целями предприятия.
- **Procurement** – Система управления закупками оптимизирует цикл от «поиска поставщика до оплаты» за счет автоматизации и социального взаимодействия, обеспечивая контроль издержек и высокую прибыль.
- **Order Management** – Система управления заказами осуществляет управление заказами по всем каналам под каждого конкретного заказчика.
- **Manufacturing** – Система управления производством оптимизирует производственный процесс с помощью визуализации, отслеживаемых сделок и социального взаимодействия, помогает контролировать издержки.
- **Maintenance Management** – Система управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования объединяет приложения по обслуживанию, ЦП и финансам с целью оптимизации операций по обслуживанию и сопровождению. Подсистема Maintenance Management должна взаимодействовать с информационной системой логистической поддержки – «CALS».
- **Internet of Things (IoT) Applications** – Приложения ИНТЕРНЕТА вещей дают возможность расширять работу связанных систем за счет данных и аналитики интернета вещей, предоставляемых в реальном времени.

4.4. Основные понятия интенсификации химико–технологических процессов и химико–технологических систем

Экономическое развитие реального сектора экономики, к которому относятся химические производства и ЦП химической продукции, может осуществляться экстенсивно или интенсивно. Слово «экстенсивность» (от лат. «*extensivus*») – количественное увеличение, распространение, расширение; «экстенсивный» – увеличенный, расширенный. Слово «интенсивность» (от лат. «*intensio*») – напряжение, усиление; «интенсивный» – усиленный, напряженный, действенный, сосредоточенный.



Рисунок 4.4.1. Основные показатели экстенсивного и интенсивного развития химических производств и предприятий.

Экстенсивное направление развития химических производств основано на росте используемых в производстве всех видов ресурсов, **интенсивное развитие** базируется на повышении эффективности использования ресурсов. Рассмотрим **основные показатели экстенсивного и интенсивного развития** химических производств.

Важными технологическими показателями эффективности энергоресурсосберегающих химико–технологических процессов (ХТП) и ХТС являются **производительность и интенсивность**.

Производительность Π – это количество выпускаемого продукта или переработанного сырья G за единицу времени t :

$$\Pi = \frac{G}{t}$$

Расходный коэффициент, или расходная норма, сырья (материала или энергии) или показатель энергосбережения отражает удельное количество используемых ресурсов на производство единицы продукции, технологическая эффективность использования расходуемых ресурсов в ХТП и ХТС определяется также показателями выход продукта, и интенсивность ХТП.

Выход продукта – это отношение реального полученного количества продукта, из использованного сырья к максимально теоретически возможному количеству, которые теоретически можно получить из того же количества сырья.

К показателям экстенсивного развития относятся численность работников, рост основных средств производства, увеличение расхода потребляемых материальных ресурсов.

Показателями интенсивного развития производства являются:

- рост производительности труда в результате сокращения всех видов потерь рабочего времени, снижения трудоёмкости, высвобождения персонала;
- снижение материалоемкости продукции за счет предотвращения потерь материальных ресурсов, оптимизации технологических режимов ХТП, применение более прогрессивных технологических процессов и предметов труда (в том числе видов используемых

материальных и энергетических ресурсов), повышения коэффициентов использования (снижение расходных норм) материалов;

- совершенствование бизнес–процессов организации производства, многоуровневая цифровизация и информатизация химических производств и цепей поставок.

В химическом инжиниринге и инжиниринге ХТС **интенсивность I** – это **производительность** ХТП, отнесенная к какой–либо величине геометрического размера аппарата (объем – V , площадь поперечного сечения – S и др.), в котором этот ХТП протекает:

$$i = \frac{P}{V} = \frac{G}{t \cdot V} \quad \text{или} \quad i = \frac{G}{t \cdot S}$$

Интенсификация ХТП – это экономически эффективное комплексное повышение удельной производительности ХТП при оптимальном снижении удельных расходных норм сырья и ТЭР; уменьшение размеров единиц оборудования; сокращение затрат рабочего времени и повышение качества готовой продукции за счет использования достижений научно–технического прогресса, обеспечивающих рост эффективности ХТП, оптимального повышения температуры и давления ХТП, изменения гидродинамической структуры потоков в аппаратах, применения принципиально новых энерго–ресурсоэффективных экологически безопасных химико–технологических процессов и химических технологий.

Основные направления интенсификации ХТП и ХТС:

1. Создание новых мембранных конструкций аппаратов и машин химической технологии;
2. Широкое использование каталитических химических процессов;
3. Использование оптимальных значений физико–химических переменных ХТП;
4. Применение водорода в энергетике;
5. Создание энерго–ресурсоэффективных ХТП;
6. Создание экологически безопасных ХТП;
7. Минимизация отходов, стоков и выбросов;

8. Оптимизация теплообменных процессов и рекуперативных теплообменных систем;
9. Оптимизация процессов и систем ректификации многокомпонентных смесей.

Таким образом, интенсификация ХТС обеспечивает увеличение объем выпуска высококачественной продукции за счет использования более эффективных средств производства (новых комбинированных технологических процессов, аппаратов и машин), эффективного потребления всех видов ресурсов и применения достижений научно–технологического прогресса.

Интенсификация ХТП и ХТС представляет собой направление экономически эффективного развития химических производств за счет более эффективных наукоемких средств производства (новых аппаратов, агрегатов и машин), прогрессивных бизнес–процессов организации производства и цепей поставок, Широкой цифровизации производств и предприятий в отличие от экстенсивного экономического роста за счет физического расширения масштабов производства при сохраняющемся уровне химических технологий, качества все видов используемых ресурсов.

Безусловно интенсификация первоначально предполагает увеличение финансовых затрат на производство, которые окупаются за счет более экономически эффективного и рационального использования все применяемых ресурсов, т.е. за счет обеспечения энергоресурсосбережения.

Важнейшим фактором интенсификации производства и экономического роста является научно–технический прогресс, который предполагает в настоящее время широкое использование всех достижений промышленной революции «Индустрия 4.0», применение наукоемких энергоресурсоэффективных экологически безопасных ХТП и ХТС.

4.5. Методология системного подхода к решению неформализованных задач интенсификации химико–технологических процессов

Интенсификация ХТП направлена на увеличение их экономической эффективности в результате целенаправленного влияния на производительность оборудования, сокращения расходов сырья, материалов и энергии, улучшения качества продукции, снижения затрат труда и повышения эффективности автоматического управления.

Системный подход позволяет выделить основные принципы использования физических воздействий на различные явления для решения задач интенсификации ХТП. Для этого проводится внутри аппаратов: классификация воздействий и обрабатываемых сред, намечаются процедуры Поиска решений задачи на физическом уровне.

Различные физические воздействия на ХТП: механические, электромагнитные и другие, которые с позиций термодинамики являются энергетическими, приводящими к изменению свойств и состоянию перерабатывающих физико–химических систем.

Исходная физико–химическая и инженерное–технологическая, или содержательная постановка неформализованной задачи интенсификации ХТП может быть различной:

1. совершенствование существующего технологического процесса и существующего оборудования;
2. инжиниринг принципиально нового технологического процесса и принципиально нового оборудования для его реализации.

В общем случае могут быть заданы только требуемые характеристики продукта на выходе аппарата и его технико–экономические показатели. В большинстве же случаев заданы и входные потоки. Ограничимся рассмотрением класса задач с заданным набором переменных вход–выход. Тогда целевая функция эффективности задачи интенсификации ХТП должна отображать результаты полного анализа существующей технологии (про-

цесса и аппарата) в отношении влияния на нее перечисленных выше факторов.

В результате этого анализа выявленные недостатки существующих ХТП должны ранжироваться и из них выбирается основной. В качестве целевых функций интенсификации можно использовать экономический показатель энергоресурсоэффективности ХТП – чистый приведенный доход (**NPV – Net Present Value**).

Значительное расширение пространства управляющих, или независимых, воздействий при добавлении интенсифицирующих физически воздействий на ХТП позволяет в принципе ставить и решать задачу глобальной оптимизации как ХТП, так и конструкции аппарата на всем возможном множестве переменных.

Наиболее типичными оптимизируемыми переменными при решении задач интенсификации ХТП при заданных ограничениях являются:

- сокращение продолжительности лимитирующих стадий процессов;
- сокращение энергозатрат;
- увеличение производительности и к.п.д.;
- улучшение качества Продуктов, получение продуктов со свойствами, не достигаемыми по «традиционной» технологии;
- уменьшение габаритов аппаратов и расхода материалов на их изготовление;
- экономия сырья;
- использование совершенно новых явлений и процессов;
- улучшение экономических и эргономических характеристик оборудования;
- ведение непрерывных управляемых процессов;
- обрабатываемые вещества совместно с аппаратом и условиями, при которых проходит ХТП, образуют сложную физико–химическую систему. Подобная система характеризуется взаимосвязью отдельных частей и их взаимодействием между собой, со смежными системами в общей ХТС и с окружающей средой.

При многомасштабном математическом моделировании ХТП и ХТС принято выделять в структуре моделей иерархические уровни: микроуровни, или молекулярный уровень; макроуровень (или уровень) малого объема, рабочей зоны аппарата, аппарата в целом и агрегата. Большинство задач, связанных с разработкой физико–химических методов интенсификации ХТП, необходимо рассматривать на уровне малого объема, хотя в некоторых специфических случаях должен быть проведен анализ и на молекулярном уровне. Естественно, что полное решение требует дальнейшего перехода и на более высокие уровни с целью разработки аппаратуры.

Далее рассматривается в основном именно макроуровень, как представляющий наибольший интерес и значительные сложности. Анализ процессов на таком уровне предполагает ряд этапов. В начале декомпозиция, т. е. выделение типичного и представительного в отношении физического механизма процесса элемента, например, отдельного зерна катализатора или пузырька газа в барботажном слое и т. п. Затем анализ макрокинетики процессов в выделенном элементе при различных физических воздействиях и выбор оптимального. И, наконец, синтез – распространение полученных результатов на всю рабочую зону или весь аппарат.

Выбор типичного элемента объема вещества представляет собой сложную и неформализованную процедуру. Этот элемент должен отражать те свойства вещества, которые являются определяющими в отношении конечной цели интенсификации процесса. В свою очередь, эти определяющие свойства зависят от вида физического воздействия на ХТП.

Для выделения минимальных типовых структурных элементов необходимо в каждой конкретной цепи воздействие – система–результат выделить в системе такие структурные единицы, которые по отдельности или в совокупности сохраняют ту же причинную взаимосвязь между воздействием и его результатами. Несомненно, что такая задача может быть решена только приближенно, в некоторых случаях возможно и вообще не решена.

В основе выделения структурного элемента в ХТП должна лежать четкая модель физико–химического процесса на макроуровне.

Сложность рассматриваемой проблемы состоит в том, что отсутствует какой-либо один унифицированный элемент процесса и аппарата для всех физико-химических воздействий. Каждое физико-химическое воздействие наиболее полно и, следовательно, точно отражается своим структурным элементом модели. Еще более проблематичным представляется модельное описание для сочетания физико-химических воздействий, существующих в пространстве и времени в некотором диапазоне изменения переменных.

На основе методологии системного подхода в химической технологии и методов принятия оптимальных решений автоматизированного поискового конструирования можно рекомендовать следующую последовательность этапов решения неформализованных задач интенсификации ХТП.

Первый этап – формирование технического задания (ТЗ). Под ТЗ на разработку подразумевается перечень основных эксплуатационных, технологических, экономических и др. требований и их значений, которым должен удовлетворять ХТП и аппарат.

В методологическом отношении поставленная задача по ряду вопросов аналогична тем, которые решаются в смежных интенсивно развивающихся областях техники: машиностроении, ракетно-космической технике, радиоэлектронике, атомном энергомашиностроении и др.

При разработке специализированных методов принятия решений, ориентированных на конкретную область техники, рекомендована следующая последовательность действий:

Упрощенно первый этап можно представить в следующем виде. Постановка задачи — осмысливание конечной цели при учете ограничений. Анализ существующего ХТП. Выявление основных отрицательных факторов (недостатков) по отношению к конечной цели. Установление причин, вызывающих недостатки. Перевод задачи на «физический» уровень. Анализ физико-химического механизма «лимитирующей» стадии процесса. Анализ физико-химических свойств веществ на «входе» в эту стадию и «выходе» из нее. «Подключение» различных физических воздействий и их комбинаций. Выбор оптимального физико-химического воздействия.

Второй этап состоит в выявлении основных информационных массивов. Применительно к процессам и аппаратам химической технологии с использованием физико–химических воздействий таковыми являются следующие банки данных:

- **М1** – физико–химических явлений и процессов;
- **М2** – известных процессов, аппаратов и химико–технологических систем;
- **М3** – поставленных требований;
- **М4** – физико–химических свойств перерабатываемых веществ;
- **М5** – физических устройств;
- **М6** – приемов и алгоритмов для обработки информации.

Создание этих информационных банков данных, дополненных методами оценки и выбора вариантов, является первоочередной задачей при разработке новых решений с использованием автоматизированных систем поиска новых технических решений в рассматриваемой области.

Основное отличие рассматриваемой задачи состоит в том, что в ХТП реализуется в основном не схема входное физическое воздействие–вещество–выходной физический сигнал, а схема «входное физическое воздействие»–«входное вещество»–«вещество на выходе». Поэтому использование последовательности физико–химических эффектов в соответствии с рекомендациями метода автоматизированного поискового конструирования не может служить основой искомого решения. Однако, используя идею анализа физико–химических воздействий, морфологический подход и методы теории искусственного интеллекта, можно рекомендовать следующий вариант принятия решений.

В любой ХТС основными являются три технологические операции: подготовка сырья, собственно химическое превращение и выделение целевых продуктов. Иерархическая структура ХТС включает уровни, начиная от молекулярного до уровня предприятия.

Ограничимся в качестве высшего уровня иерархии ХТС рассмотрением типового процесса и соответственно уровнем аппарата. Разработка нового

технического решения (ТР) должна начинаться с формулировки технического задания (ТЗ). ТЗ выделяет область допустимых значений, соответствующих требованиям показателей, оценивающих ТР.

В технологическом аппарате производится преобразование физико-химических свойств веществ входных потоков в требуемые свойства веществ выходных потоков (рис. 4.5.1). Это преобразование представляет собой технологическую операцию, состоящую из ряда процессов, осуществляемых при определенных воздействиях (механических – М, тепловых – Т, гидродинамических – Г, акустических – А, электромагнитных – ЭМ, химических – Х).

Пусть \vec{X} – вектор входных потоков вещества (x_1, \dots) с заданными свойствами (a_1^i, a_2^i, \dots) , \vec{Y} – вектор выходных потоков (y_1, y_2, \dots) с требуемыми свойствами (e_1^i, e_2^i, \dots) . Свойства вещества также, как и воздействия, разделяются на виды: механические, акустические и т. д.

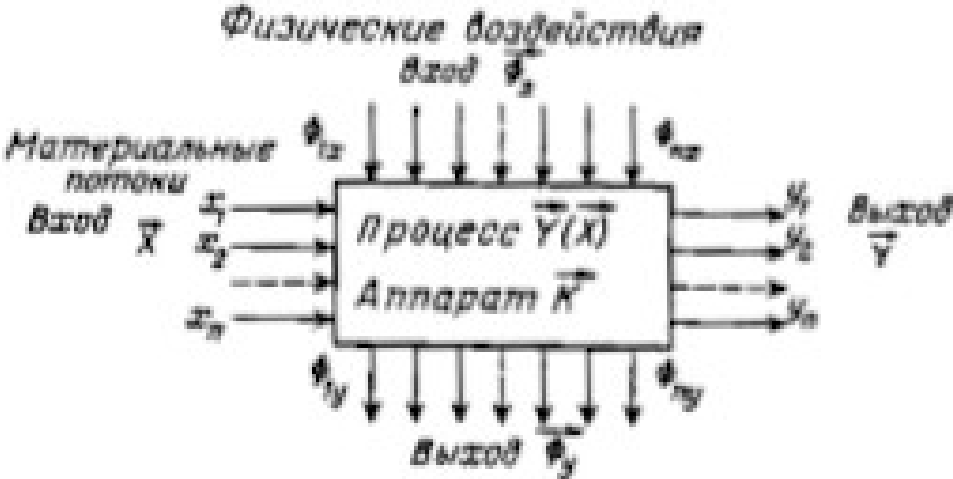


Рисунок 4.5.1. Общая блок-схема взаимосвязи различных переменных и физических воздействий при решении задачи интенсификации ХТП

Преобразование \vec{Y} осуществляется при воздействии $\vec{\Phi}_x$ с компонентами Φ_{ix} в аппарате с конструкционными параметрами \vec{K} (рис. 4.5.1).

На входные и выходные переменные, воздействия и конструктивные параметры накладывают ограничения O . Общая взаимосвязь переменных при поиске решения неформализованной задачи показана на рис. 4.5.1.

| Свойства веществ на входе | | Входные воздействия $\vec{\Phi}_x$ | | | | | | | | Свойства веществ на выходе | |
|---------------------------|---------|------------------------------------|-------------|----------|---|----|----------|---|-------------|----------------------------|---------|
| | | М | Г | А | Т | ЭМ | . | . | р | | |
| | x_i | Φ_{1x} | Φ_{2x} | . | . | . | . | . | Φ_{3x} | | y_i |
| М | a_1^l | + | - | . | . | . | . | . | . | | b_1^l |
| А | a_2^l | . | . | ∞ | . | . | . | - | . | | b_2^l |
| Т | . | - | . | . | + | 0 | . | . | + | | . |
| ЭМ | . | . | . | + | . | + | ∞ | . | . | | . |
| Х | . | 0 | . | . | . | . | . | . | . | | . |
| Р | a_n^l | . | 0 | . | . | . | ∞ | . | + | | b_n^l |

Рисунок 4.5.2. Таблица физико-химических воздействий для принятия решений задачи интенсификации ХТП

Неформализованная задача интенсификации ХТП состоит в выборе или поиске наиболее эффективной совокупности физико-химических воздействий при заданной паре переменных вход – выход и наложенных ограничениях. После варьирования физическими воздействиями и их сочетаниями надо найти их наиболее целесообразную совокупность, которая обеспечивает проведение требуемого (возможно нового) процесса. Следующий этап – это инжиниринг на этой основе аппарата, технико-экономические прочие показатели которого превосходят показатели лучших существующих образцов.

С целью сокращения области поиска решения задачи интенсификации ХТП проводится качественный анализ степени влияния физико-химических воздействий на входные дели переменные. Процедура заканчивается при достижении заданной цели, т.е. попадании свойств веществ в область требуемых значений, с учетом выполнения наложенных ограничений. После разработки математической модели ХТП проводится оптимизация. Физико-химические воздействия ХТП (рис. 4.5.2) разбивают на три группы:

1. **нейтральные** Φ^0 , не влияющие на свойства вещества в смысле получения по этому веществу конечного результата; обозначаются символом «0».

2. **интенсифицирующие** Φ^+ , вызывающие приближение свойств вещества к области требуемых значений; обозначаются символом «+».
3. замедляющие Φ^- , вызывающие удаление свойств вещества относительно области требуемых значений; обозначаются символом «-»

Среди воздействий второго и третьего типа могут быть пороговые или критические, т. е. полностью прекращающие переход \dot{Y} и обозначаемые «∞». Результаты влияния физико–химических воздействий на входные переменные в соответствии с принятой классификацией и обозначениями можно систематизировать в виде специальной таблицы (рис. 4.5.2), которую можно условно назвать таблицей поиска решений задачи интенсификации рассматриваемого ХТП.

Результаты воздействий со знаком “+” должны быть подвергнуты дальнейшему количественному анализу и (или) экспериментальной проверке с целью установления близости полученных результатов требуемым значениям. Если таких воздействий оказывается несколько, то из них, в соответствии с техническим заданием, выбирается наиболее подходящее, например дающее максимальный выход продукта. Рассматривается также вопрос последовательной или параллельной комбинации таких воздействий, например электромагнитного и акустических полей.

Если ,таблица интенсификации (рис. 4.5.2) будет содержать только результаты «0» и «-», то необходимо, используя поочередно каждое из воздействий, изменять свойства входных веществ и повторить проведенный анализ с измененными входными переменными. При повторных отрицательных результатах можно использовать парные и более сложные сочетания переменных, изменяющие начальные свойства системы. Поиск оптимальных решений неформализованных задач интенсификации ХТП осуществляется с применением методов теории искусственного интеллекта и с использованием экспертных систем в химической технологии.

На этом этапе построения ТР целесообразно использовать топологические методы анализа образующихся физико–химических структур из потоков вещества и воздействий. Затем необходимо математическое или экспе-

риментальное моделирование процесса при выбранных физико–химических воздействиях. Завершающим этапом в первой «процессной» части разработки служит формирование ТЗ на конструирование аппарата ХТС.

Особенность конструкционного решения с применением физико–химических воздействий состоит в использовании наряду с традиционными элементами аппаратов (насадок, решеток, теплообменников и т. п.) новых физических устройств и элементов (излучателей, волноводов и т. п.). При разработке аппарата используются базы данных и к традиционным элементам конструкции аппарата предъявляются новые требования (пропускание, отражение и поглощение в заданном диапазоне частот, свойства фокусировки, согласования с генератором и др.). Общая блок–схема процедуры поиска решений неформализованных задач интенсификации ХТП с применением различных физико–химических воздействий показана на рис. 4.5.3.

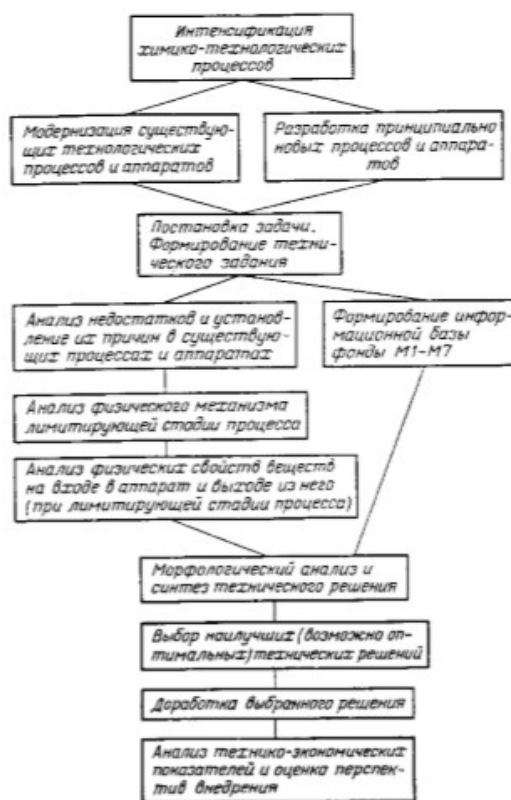


Рисунок 4.5.3. Блок–схема процедуры поиска решений неформализованной задачи интенсификации ХТП.

Глава 5. Принципы, основные направления и способы интенсификации энергоресурсосберегающих химико–технологических процессов

5.1. Краткая характеристика принципов микроуровневой интенсификации энергоресурсосберегающих химико–технологических процессов

С позиции методологии системного подхода в химической технологии и теории инжиниринга энергоресурсосберегающих ХТС предложены четыре основных принципа микроуровневой интенсификации ХТП (по–английски **Process Intensification – PI**):

1. Принцип **максимизации эффективности внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий** (пример: динамически изменяющиеся условия для достижения кинетических режимов с более высокой конверсией и селективностью).
2. Принцип **обеспечения всем молекулам одинаковых условий по времени и маршрутам взаимодействия** (пример: реакция в потоке идеального вытеснения с равномерным, безградиентным нагревом).
3. Принцип **оптимизации движущей силы процесса и максимизации удельной площади межфазной поверхности на каждом уровне взаимодействия** (пример: увеличение площади поверхности массо–передачи через микроканальные конструкции).
4. Принципы **максимизации синергетического эффекта от взаимодействия отдельных элементарных явлений или процессов** (пример: многофункциональные реакторы, хемодистилляция, мембранная абсорбция).

На молекулярном уровне для интенсификации ХТП можно модифицировать:

- маршрут химического синтеза,

- химическую кинетику,
- топологическую структуру носителей катализатора:
 - формо–селективные структуры,
 - функционализация поверхности,
 - оптимальное распределения радиусов пор и связности пор.

Эти способы интенсификации на микроуровне ХТС тесно связаны с катализом.

Одинаковые условия на взаимодействия молекул может быть достигнуты, например, статическими смесителями, которые обеспечивает для массообмена почти идеальный поршневой поток с очень интенсивным перемешиванием и повышением специфической межфазной поверхности. Структурированные упаковки в реакторах, такие как монолиты, сетки, пены и различные конструкции микросмесителей, также могут улучшить местное перемешивание.

Одинаковые условия на взаимодействия молекул может быть достигнуты, например, статическими смесителями, которые обеспечивает для массообмена почти идеальный поршневой поток с очень интенсивным перемешиванием и повышением специфической межфазной поверхности. Структурированные упаковки в реакторах, такие как монолиты, сетки, пены и различные конструкции микросмесителей, также могут улучшить местное перемешивание.

Практическая аппаратно–технологическая реализация указанных принципов микроуровневой интенсификации ХТС для одного аппарата ХТС (микроуровень ХТС) осуществляется по двум направлениям:

1. Применение специального оборудования для ХТП.
2. Применение специальных физико–химических технологических преобразований вещества в аппаратах химической технологии.

Классификация способов интенсификации ХТП (двух основных направлений интенсификации ХТП на макроуровне): виды специального оборудования, физико–химические и технологические методы интенсификации ХТП представлены на рис. 5.1.1.



Рисунок 5.1.1. Классификация способов интенсификации ХТП: Виды оборудования, физико-химические и технологические методы интенсификации ХТП

Под интенсификацией прежде всего понимается увеличение скорости, т.е. сокращение времени технологических операций, повышение мощности, увеличение объема выхода продукта и др. Общее условие обеспечения интенсификации может быть определено первым законом термодинамики:

$$Q = K \cdot \Delta C, \quad (5.1.1)$$

где Q – величина потока теплоты или массы вещества; K – химический коэффициент, зависящий от физико-химических свойств материала; ΔC – изменение во времени движущей силы.

Для каждого вида переноса массы и энергии формула (5.1.1) имеет свои особенности. Например, для переноса теплоты через пластину площадью F при перепаде температур Δt за время τ величина теплового потока имеет вид:

$$Q_T = K_T \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau \quad (5.1.2)$$

изменение массы (концентрации) G при переносе, например, через мембрану площадью F

$$G_\tau = K_{II} \cdot F \cdot (C - C_0), \quad (5.1.3)$$

где C_0 – начальная концентрация газа; C – концентрация на момент времени τ ; K_T , K_D – кинетические коэффициенты соответственно для теплопередачи и переноса вещества.

В общем случае увеличение движущей силы на единицу поверхности в единицу времени достигается за счет повышения разности температур, концентрации компонента, его парциального давления обычно в начальной стадии и снижения – в заключительной. Увеличение поверхности контакта фаз достигается:

- дроблением,
- диспергированием,
- распылением,
- перемешиванием,
- созданием так называемого кипящего или взвешенного слоя,
- вибрацией,
- ударным или акустическим воздействием,
- своевременным выводом из аппарата выделенных веществ.

Общую методологию интенсификации ХТП и ХТС можно представить в виде «окна новшеств по интенсификации ХТС» на микроуровне – интенсификация ХТП – область химической интенсификации, и мегауровне – область интенсификации проектируемых ХТС в целом (рис. 5.1.2).

Классификация видов и методов интенсификации технологических процессов приведена на рис. 5.1.3.

Методы интенсификации разделяются на два структурных уровня: макро– (действие на частицы вещества, т.е. группы молекул или атомов) и микроскопический (ионно–молекулярный, межмолекулярный, атомный). На макроуровне применяются гидродинамические и тепловые воздействия.

Процессы переноса осуществляются за счет конвекции, при которой происходит обтекание макрочастиц твердого материала с возможным регулированием скорости. Математически эти процессы описываются системой дифференциальных уравнений с граничными и начальными условиями, лимитирующими область протекания процесса. В них используются

также постоянные кинетические коэффициенты, характерные для конкретной среды и процесса.

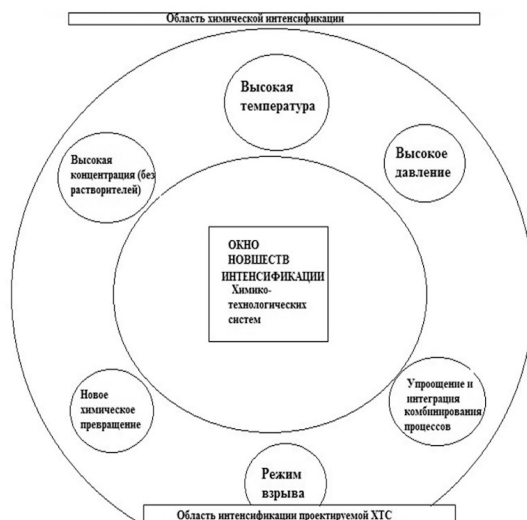


Рисунок 5.1.2. Схематическое представление «окна новшеств интенсификации ХТП и ХТС»



Рисунок 5.1.3. Классификация методов интенсификации технологических процессов.

В технологических схемах давление изменяется для интенсификации выпаривания, ректификации, гидролиза полисахаров в масложировом, крахмально–патоковом и других производствах. Изменение температуры используют главным образом в сушильных, сорбционных (поглотительных) и десорбционных (выделение поглощенного компонента) установках. Скорость сушки продуктов определяется потенциалом, равным разности температур сухого (t_c) и мокрого (t_M) термометров:

$$E = t_c - t_M \quad (5.1.4)$$

Поэтому с повышением температуры сушеного продукта потенциал процесса возрастает. Согласно второму закону термодинамики количество Возможной работы в такой системе увеличивается с ростом разности температур.

Повышение температуры приводит к увеличению констант скорости реакций, коэффициентов теплопередачи, теплоотдачи, массообмена, диффузии и др. Для любого процесса существует свой предел повышения температуры.

В технологических процессах увеличение поверхности контакта на границе двух фаз (твердой–газовой; твердой–жидкой) достигается перемешиванием в так называемом взвешенном или кипящем слое, образуемом за счет пропускания газа или жидкости снизу вверх через слой зернистого материала с такой скоростью, при которой его частички пульсируют в потоке газа или жидкости в пределах взвешенного слоя. Такая интенсификация технологического процесса широко применяется при сушке, например, пищевых продуктов, при очистке газов и жидкостей.

5.2. Основные факторы и способы интенсификации химических процессов

Интенсификацию химических процессов на микроуровне в реакторе обеспечивают целенаправленным изменением какой–либо группы факторов, оказывающих определяющее влияние на скорость химического процесса и выход продуктов реакции (рис. 5.1.3). Для процессов, которые про-

текают только в кинетической области, такими факторами являются температура, давление, концентрация реагирующих веществ и применение катализаторов (рис. 5.1.2).

Для процессов, протекающих в диффузионной области, применяют гомогенизацию, перемешивание, турбулизацию потока, а также осуществляют рациональный выбор направления движения потоков.

Для процессов, протекающих в переходной области, необходимо применять как кинетические факторы (температура, давление, катализаторы, повышение концентрации взаимодействующих веществ), так и диффузионные (гомогенизация, перемешивание, направленное движение потоков).

Для определения оптимальных значений указанных выше факторов интенсификации химических процессов (рис. 5.1.3) необходимо выполнить технико-экономический анализ, рассчитать технологические и производственные возможности достижения значений основных параметров проведения химических процессов.

Кратко рассмотрим основные способы интенсификации химических процессов за счет целенаправленного изменения основных внутренних факторов, которыми являются параметры и режимы функционирования химических процессов:

- перемешивание,
- повышение степени гомогенизации,
- повышение температуры,
- повышение давления,
- катализаторы,
- направление движения потоков,
- внешние энергетические воздействия.

Перемешивание позволяет выравнивать концентрации и температуры взаимодействующих фаз. Особенно эффективно оно для жидкостей вследствие небольшой скорости диффузии молекул в жидкой фазе.

Применяют следующие виды перемешивания:

- механическое,

- пневматическое,
- электромагнитное и т.д.

Создание турбулентного режима движения потока позволяет за счет ускорения перемещения взаимодействующих фаз существенным образом интенсифицировать процесс естественной диффузии молекул. При турбулизации происходит ускорение процесса смешения фаз и увеличение поверхности их взаимодействия. Для улучшения процесса турбулизации стремятся более тонко измельчить взаимодействующие потоки и добиться высокой скорости движения их в аппарате.

Повышение степени гомогенизации взаимодействующих веществ особенно эффективно для систем жидкость–жидкость (ж–ж), газ–твердое–жидкость (г–т–ж), твердое–жидкость (т–ж) и т.д., поскольку позволяет достигнуть требуемой степени завершения процесса, повысить выход и качество продукции и интенсифицировать химический процесс. Для достижения однородности химического и фракционного состава веществ применяют:

- гравитационные,
- центробежные,
- электростатические,
- электромагнитные,
- химические

и другие способы разделения неоднородных систем. Для осуществления гомогенизации неоднородных жидких и твердых фракций используют, например:

- механические измельчители,
- вибрацию,
- ультразвук,
- высоковольтные электрические разряды в жидкой среде.

Повышение температуры реакции обычно позволяет увеличить константу скорости реакции, но в значительно меньшей степени повысить величину коэффициента диффузии. При увеличении температуры на 10°C ско-

рость реакции в среднем увеличивается в 2–4 раза. Верхний предел повышения температуры может быть ограничен низкой термостойкостью конструкционных материалов и катализаторов, для которых рабочая температура в ряде случаев не соответствует максимально допустимому значению температуры реакции.

Повышение давления существенно увеличивает скорость реакций в газовой фазе, протекающих с уменьшением объема, что позволяет снизить габариты аппарата и диаметры трубопроводов. Ограничения максимальной величины давления могут быть целесообразны по экономическим причинам при переработке низкоконцентрированных газов вследствие высоких энергетических затрат на сжатие и перемещение неучаствующих в реакции газовых фракций, которые в данном случае являются балластом.

Повышение концентрации взаимодействующих компонентов может быть осуществлено в результате обогащения исходного сырья, а также при непрерывном отводе продуктов реакции из зоны взаимодействия (при использовании вакуума, конденсации, поглощении газа на твердом поглотителе – для газообразных продуктов, кристаллизации, испарения – для жидких смесей и т.д.)

Применение катализаторов позволяет снизить величину энергии активации молекул и тем самым повысить скорость реакции. Катализаторы, в качестве которых используют химические вещества или сложные их смеси, которые только участвуют в реакции, но не расходуются в процессе и остаются неизменными в течение определенного промежутка времени (до старения).

Для ускорения и повышения эффективности диффузионных процессов применяют направленное движение потоков. Например противоток обеспечивает большую равномерность и полноту протекания процесса в объеме аппарата, что сопровождается и более высоким выходом продукта. Высокая интенсивность химического процесса может быть достигнута и в аппаратах с перекрестным током, однако такая организация движения потоков более сложна, чем при противотоке.

Важными факторами интенсификации химических процессов являются различные энергетические воздействия, которые позволяют создавать фотохимические, радиационно–химические и плазменно–химические процессы.

Для интенсификации промышленных химических процессов обычно применяют различные комбинации указанных выше факторов и способов, классификация которых представлена на рис. 5.1.3.

5.3. Способы интенсификации теплообменных процессов

Задача интенсификации процесса теплообмена и создания высокоэффективных теплообменных аппаратов весьма актуальная для обеспечения высоких показателей ресурсосбережения ХП. Теплообменные аппараты классифицируются по принципу действия, целевому назначению и конструкции. Для интенсификации процессов теплообмена в теплообменных аппаратах применяют следующие приемы.

1. Предотвращение отложений (шлама, солей, коррозионных оксидов) путем систематической промывки, чистки и специальной обработки поверхностей теплообмена и предварительного отделения из теплоносителей веществ и примесей, дающих отложения.
2. Продувка, трубного и межтрубного пространства от инертных газов, резко снижающих теплообмен при конденсации паров.
3. Искусственная турбулизация потока за счет применения турбулизирующих решеток, искусственной шероховатости созданием пульсации или закручиванием потока и т.д. Однако при определенных условиях может наступить момент, когда темп роста сопротивления потока будет превалировать над темпом роста теплоотдачи и развитие турбулентности будет экономически бесполезным.
4. Оребрение поверхности теплообмена, целесообразное как для повышения коэффициента теплоотдачи, так и для снижения массы аппарата. Поверхность оребрения, в 5–10 раз превосходящая поверхность

несущих трубок, не подвержена одностороннему давлению, а поэтому ребра можно выполнить из более тонкого материала, чем стенки труб, и этим достичь значительного снижения массы аппарата и расхода металла.

5. Повышение скорости теплоносителей; увеличение радиационной составляющей; запыление потоков прозрачных для инфракрасного излучения.
6. При кипении жидкостей добиваются увеличения числа центров парообразования, большего перегрева жидкости и поверхности кипения, улучшения условий отвода пара, уменьшения доли поверхности пузырей, контактирующей с более холодными слоями жидкости. Для этого применяют ребристые трубы и каналы, поверхности с пористым покрытием, организуют кипение в тонких пленках жидкости, во взвешенных слоях твердых частиц и т.п.
7. При конденсации пара стремятся уменьшить термическое сопротивление пленки конденсата, для чего организуют процесс в каналах с малыми поперечными размерами, повышают скорость движения пара, осуществляют отсос конденсата через пористые покрытия поверхности, улучшают условия его отвода с помощью сил поверхностного натяжения, выполняя на поверхности канавки, покрывают поверхность гидрофобными веществами, ухудшающими смачиваемость поверхности, для перехода от пленочной к капельной конденсации.

Интенсификация процесса теплообмена путем повышения разности температур между теплоносителем и поверхностью материала за счет увеличения температуры теплоносителя наиболее эффективна и широко применяется. Но одновременно с этим возрастает перепад температур между центром и поверхностью изделия, что препятствует движению влаги к поверхности тела.

Интенсификация процессов теплообмена обычно не привлекает внимания, если использование теплообменника с улучшенными характеристика-

ми не дает выигрыша в стоимости по сравнению с использованием стандартных образцов. Дополнительными факторами, влияющими на выбор метода интенсификации, являются недостатки материалов, недостаточные возможности, безопасность и надежность теплообменника.

Интенсификация процесса теплообмена обеспечивается выполнением теплообменника с малым шагом между трубами ($s/d \approx 1,3$), а также выбором оптимальной плотности орошения на основании выполнения в каждом отдельном случае технико-экономических расчетов.

Интенсификация процесса теплообмена в испарителе почти всегда связана с дополнительной затратой энергии. При интенсификации теплоотдачи от хладоносителя к стенке за счет повышения его скорости, применения оребрения или устройств, турбулизирующих его поток, неизбежно возрастание мощности, потребляемой насосом, мешалкой или вентилятором. При интенсификации теплоотдачи от стенки к кипящему в трубах хладагенту также часто увеличивается гидравлическое сопротивление потоку хладагента в аппарате, приводящее к понижению давления кипения на выходе из аппарата, что связано с менее экономичной работой компрессора и ростом мощности, потребляемой им на единицу холодопроизводительности.

Интенсификация процессов теплообмена является важной и актуальной задачей исследования теплообменник аппаратов. Для увеличения теплообмена могут быть использованы различные методы:

- применение турбулизирующих вставок,
- ультразвук,
- пульсация давлений,
- вибрация теплообменных поверхностей.

Следует отметить, что применение ультразвука в теплообменных аппаратах дает значительное, увеличение теплового потока с единицы поверхности теплообменника, но, в свою очередь, приводит к быстрой разгерметизации теплообменника. Наложение пульсации давления увеличивает теплосъем с единицы поверхности в некоторых случаях до 80%, но такие теплообменники должны быть настроены на резонансную частоту, и малейшее откло-

нение от нее сводит к нулю все усилия по интенсификации процесса теплообмена. Вибрация теплообменных поверхностей дает увеличение теплосъёма с единицы поверхности до 20% при условии, что имеются небольшие тепловые потоки и только до кризиса кипения. Наиболее простым и достаточно эффективным способом интенсификации является установка механических турбулирующих вставок, так как в этом случае не нарушается герметичность и надежность работы аппарата.

Интенсификацию процесса теплообмена внутри трубки так же возможно обеспечить другим способом, например витыми трубками, плавно чередующимся сплющиванием диаметра трубки с определенным шагом, попередным смещением угла на 90° , накаткой чередующихся плавно очерченных кольцевых или винтообразных выступов на внутренней поверхности гладкой трубы.

Для интенсификации процессов теплообмена и сепарации широко используется закручивание потока в неподвижном осесимметричном канале, в котором вращательное движение газодисперсной смеси создается закручивающим устройством, установленным на входе в канал.

Для интенсификации процесса теплообмена в змеевики печей вакуумных блоков подают водяной пар. С вводом пара ускоряется движение сырьевого потока и исключается местный перегрев. По мере движения по трубам мазут начинает испаряться и теплообмен происходит в условиях пузырькового кипения, которое сопровождается резким увеличением паровой фазы. В этот период значительно возрастает склонность мазута к коксообразованию от перегрева его пристенной пленки, несмотря на увеличение скорости движения потока парожидкостной смеси. В пленке быстро растет концентрация термически нестойких соединений – асфальтенов, предшественников кокса.

Для интенсификации процесса теплообмена в указанных испарителях применяют различные способы оребрения внутри труб.

Благодаря интенсификации процесса теплообмена при одинаковых энергетических затратах и тепловых нагрузках коэффициент теплопередачи возрастает в 2–2,5 раза.

Принципы интенсификации процесса теплообмена широко используются в промышленности при конструировании теплообменных аппаратов.

Условием интенсификации процесса теплообмена является равенство частоты внешнего акустического воздействия частоте дискретных составляющих собственных колебаний в пристенном слое, имеющих максимальную амплитуду при данном числе Рейнольдса.

Поэтому для интенсификации процессов полного теплообмена также прибегают к оребрению стенок со стороны воздуха.

Второй причиной интенсификации процесса теплообмена при испарении является нарушение пристенного пограничного слоя очаговыми процессами испарения. При испарении жидкости при обычном температурном давлении объем вещества увеличивается примерно в 10^3 раз, а при конденсации пара происходит такое же уменьшение объема. В результате очаговых процессов испарения и конденсации происходит нарушение структуры ламинарного пограничного слоя, что ведет к интенсификации тепло- и массообмена. Это приводит к увеличению коэффициентов теплообмена примерно на один порядок.

В целях интенсификации процесса теплообмена наружные поверхности трубок холодильника подвергают оребрению для увеличения поверхности теплоотдачи, так как коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубки во много раз меньше, чем от трубки к охлаждающей воде.

5.4. Способы интенсификации процессов ректификации

Системы ректификации многокомпонентных смесей, которые являются одними из наиболее энерго- и капиталоемких отделений крупнотоннажных химических и нефтеперерабатывающих производств, определяют качество выпускаемой продукции, существенно влияя на показатели ресурсосбере-

жения и экономическую эффективность производства в целом. К основным направлениям снижения энергопотребления и металлоемкости системы ректификации относятся:

1. оптимизация расхода флегмы, числа тарелок и места ввода тарелки питания;
2. использование термодинамически рациональных процессов рекуперативного теплообмена и компрессии различных потоков колонны для утилизации вторичных энергоресурсов;
3. совмещение процессов химического превращения и ректификации с целью утилизации тепла экзотермических реакций;
4. применение вакуумной ректификации с целью понижения температур кипения смесей;
5. ввод в структуру систем сложных колонн и комплексов колонн;
6. разработка оптимальных ациклических структур систем ректификации, потребляющих внешние теплоносители различных параметров состояния;
7. создание оптимальных структур энергосберегающих систем ректификации;
8. конструирование новых контактных устройств с целью интенсификации процессов массо- и теплообмена между паровой и жидкой фазами.

В работах для различных условий проведения процесса ректификации приводится описание целого ряда мероприятий, направленных на снижение энергетических затрат. Так, при неизменной конструкции колонн, направлении и составе технологических потоков снижение энергозатрат процесса ректификации может быть достигнуто только за счет уменьшения расхода потока флегмы и (или) путем предварительного нагревания потока питания. С точки зрения энергетики процесса ректификации важно установить минимальную величину флегмового числа, рассматривая его как независимую переменную. Уменьшение коэффициента запаса флегмового числа, во-первых, приводит к установке большого числа тарелок в колонне и,

следовательно, связано с увеличением капитальных затрат на отдельные колонны, а, во-вторых, вызывает изменение многих параметров технологических режимов процесса, что приводит к неустойчивой работе колонны. В простейшем варианте для целей синтеза оптимальных систем ректификации величина коэффициента запаса по флегмовому числу равна:

$$\delta R = 1,2 \div 1,5.$$

Когда заданы значения расходов продуктов, основными оптимизирующими параметрами, помимо флегмового числа, являются давление и соотношение тарелок для верхней и нижней секций колонны. Выбор повышенного давления в колонне определяется экономической выгодностью использования обычных хладагентов (охлаждающей воды и воздуха) для конденсации парового потока в дефлегматоре, если это не приводит к чрезмерно высоким давлениям. При этом температура верха колонны определяется как температура кипения принятого хладагента, увеличенная на некоторую заданную разность температур в дефлегматоре. Если давление насыщенных паров верхнего продукта при этой температуре меньше некоторого допустимого давления, то оно и выбирается в качестве оптимального. В противном случае осуществляется переход к низкотемпературному хладагенту. Выбор вакуума в колонне, как правило, определяется максимально допустимой температурой кипения нижних продуктов, ограничения на которую обусловлены термостабильностью компонентов разделяемых органических смесей и их коррозионными свойствами. Оптимальное остаточное давление принимается равным давлению насыщенных паров нижнего продукта при заданной максимально допустимой температуре.

Для выбора давления в системе необходимо сначала определить составы продуктов всех потенциально возможных колонн. Это осуществляется одновременно с определением составов питания всех разделителей. В работах рассматривается выбор оптимального соотношения между числами тарелок в верхней и нижней секциях колонны. В последнее время широко изучается использование в ректификационных колоннах тепловых насосов. Приближенное определение оптимальных параметров теплового насоса

может проводиться по специальной методике, параметры самого процесса ректификации выбираются так же, как и для простой колонны. Ректификационные установки с тепловым насосом или с рекомпрессией пара при умеренных температурах становятся все более привлекательными несмотря на более сложное аппаратное оформление.

Одним из способов снижения ТЭР является широкое применение совмещенных процессов и комбинированных установок. Экономия энергоресурсов от совмещения химических и массообменных процессов достигается за счет сокращения затрат на промежуточное разделение продуктов реакции, за счет улучшения условий управления процессом и увеличения мощности производства.

Совмещение химической реакции и процесса ректификации, т.е. создание комбинированного хеморектификационного процесса (рис. 5.1.1) – является одним из перспективных способов снижения энергетических затрат на ведение процесса и особенно выгодно, когда химическая реакция протекает с большим тепловым эффектом. В этом случае тепло реакции может непосредственно использоваться на получение парового потока процесса ректификации. Для создания таких совмещенных процессов необходимо разрабатывать новые конструкции аппаратов, максимально использующих возможности совмещения реакции и ректификации. Работы по совмещенным процессам в настоящее время находятся в начальной стадии, однако их эффективность достаточно высока. В настоящее время для разделения азеотропных смесей наметилась тенденция перехода от простых последовательно связанных между собой ректификационных колонн к более сложным ректификационным комплексам, снижающим энергетические затраты систем. В системах ректификации многокомпонентных смесей значительное снижение энергозатрат возможно за счет организации взаимосвязи тепловых потоков внутри схем, образующих энергосберегающие технологические связи между колоннами. Рассмотрены различные энергосберегающие технологические связи внутренних потоков систем ректификации. Энергосберегающие технологические связи для одной или различ-

ных колонн реализуются путем объединения в теплообменниках либо верхних и нижних продуктовых потоков либо верхних и нижних продуктовых потоков колонн с использованием теплового насоса, либо нижних потоков и потоков питания колонны, либо верхних потоков и потоков питания колонн. В пределах технологической схемы системы ректификации источником тепла являются потоки сверху колонны, а стоками тепла – кубовые продукты. Объединение потоков между собой позволяет сократить потребность системы во внешних теплоносителях. Очевидно, вторичное использование тепла потоков для систем ректификации без тепловых насосов возможно лишь при выполнении определенных условий, отражающих физическую реализуемость процесса теплообмена и имеющих количественные характеристики. К таким условиям относятся:

- а) наиболее летучий компонент возможного потока должен располагаться вверху каждой стадии колонны разделения;
- б) энергетически объединяемые потоки должны иметь разность температур, обеспечивающую эффективные условия теплообмена и обладать мощностью, достаточной для требуемого подогрева всего потока в аппаратах приемлемого типа и размера. Заметим, что мощность верхнего потока как источника тепла является функцией флегмового числа;
- в) совместно с наличием источника и стока тепла определенной мощности энергетическое объединение потоков должно быть реализуемо в пределах технологической схемы.

При этом следует учитывать, что один и тот же поток не может быть в технологической схеме одновременно и источником и стоком тепла. Промежуточное положение между комплексами со связанными тепловыми потоками и обратными системами ректификации занимают комплексы с частично связанными тепловыми потоками. Указанные комплексы колонн реализованы либо в виде колонны с выносными отпарными секциями, в которой происходит последовательное отделение тяжелых компонентов, либо в виде колонны с выносными укрепляющими секциями, в которой происходит последовательное отделение легких компонентов.

Эти комплексы колонн имеют один общий дефлегматор и несколько кипятильников или один общий кипятильник и несколько дефлегматоров. Энергозатраты на разделение в комплексах с частично связанными тепловыми потоками являются средними между затратами обычных систем ректификации и затратами в комплексах с полностью связанными тепловыми потоками. Все рассмотренные комплексы колонн ректификации обладают следующими недостатками:

1. необходимостью поддержания изобарных условий во всех колоннах комплекса;
2. некоторым увеличением числа ступеней разделения;
3. усложнением схемы регулирования.

Последнее обстоятельство не играет особо важной роли благодаря самокомпенсации. Эффективность комплекса мало чувствительна к значениям концентраций и расходов промежуточных потоков, связывающих колонны между собой. При перераспределении потоков более высокая степень разделения в одной секции колонны компенсируется снижением степени разделения в другой секции.

5.5. Комбинированные химико–технологические процессы

Комбинирование в одном аппарате химических технологий нескольких типовых ХТП является одним из важных специальных инженерно–технологических методов физико–химического преобразования вещества, который обеспечивает интенсификацию ХТС (рис. 5.1.1).

Наиболее широко используются следующие комбинированные или совмещенные ХТП (см. рис. 5.1.1):

- хемо–ректификация,
- хемо–сорбция,
- хемо–экстракция,
- хемо–кристаллизация,
- мембранные реакторы,

- мембранная абсорбция,
- мембранная дистилляция,
- адсорбционная дистилляция.

Для предприятий химического, нефтехимического и нефтегазохимического комплекса значительная экономия топливно–энергетических ресурсов (ТЭР) обеспечивается за счет комбинирования (в английской литературе – «интеграции») типовых ХТП и технологических установок между собой. Например, объединение установок электрообессоливания и первичной переработки нефти, риформинга бензиновых фракций, гидроочистки дизельных и керосиновых фракций, газофракционирования в одной комбинированной установке типа ЛК–бу позволяет снизить расход топлива на 15%, электроэнергии – на 22%, оборотной воды – на 36% по сравнению с переработкой аналогичного количества нефти на отдельно расположенных установках. Комбинирование крупных химических производств в составе комбинатов или производственных объединений также позволяет лучше использовать ТЭР и сочетать энергопотребляющие и энерговоделющие производства. Не случайно, что удельный расход ТЭР на некоторых комбинированных предприятиях ниже, чем на ряде монопродуктовых предприятий аналогичного профиля. Особенно важным следствием комбинирования, приводящим к заметному снижению расхода ТЭР, является сокращение количества стадий переработки исходного сырья в конечную продукцию, что особенно эффективно для производств, имеющих сложные подсистемы промежуточного разделения продуктов реакции. Так, переход на одностадийное дегидрирование бутана в дивинил обеспечивает экономию, по крайней мере, половины ТЭР, требуемых на осуществление двухстадийного процесса. Прямое окисление этилена в ацетальдегид обеспечивает снижение энергорасходов примерно на 17% по сравнению с двухстадийным методом получения ацетальдегида этилена через стадию получения этилового спирта. Комбинирование аппаратов для экзо– и эндотермических процессов позволяет создавать комбинированные ХТС с энергетически компенсированной конверсией при минимальном числе стадий

производства. Одним из примеров такого комбинирования может служить использование теплоты гелия, рециркулирующего через атомный реактор, для проведения эндотермического процесса производства синтез-газов или восстановительных газов для металлургии.

Одним из направлений рационального использования энергии различных видов на предприятиях НГХК является создание комбинированных энерготехнологических установок. Комбинирование процессов термической подготовки топлива выработки ценных химических продуктов с производством электрической энергии создает определенные связи между энергетической и технологической частями установки и взаимное влияние их параметров. Происходящие в установке термохимические и термодинамические процессы превращения одного вида энергии в другой заканчиваются при наступлении термодинамического равновесия рассматриваемой системы, определяемого вторым законом термодинамики. Количество превращаемой энергии определяется величиной максимально возможной работы, или эксергией, участвующих в процессах тел. Путем составления эксергетических балансов отдельных процессов и частей энерготехнологических установок легко установить место и величину каждой потери, вызванной необратимостью того или иного процесса. Материальный, тепловой и эксергетический балансы установки пиролиза мазутов показывают, что тепловые и эксергетические потери отличаются незначительно (соответственно 3,9 и 5,8%). Это объясняется тем, что в процессе пиролиза в основном происходят химические превращения, лишь примерно 15% химической энергии мазута превращается в тепловую ($t=1140^{\circ}\text{C}$). Для осуществления процесса пиролиза 1 т мазута в этой установке требуется более 0,6 т перегретого пара. Кроме того, водяной пар требуется и для регенерации жидкофазных поглотителей в системах сероочистки и отделения жидкой фракции. Общее количество расходуемого на технологические потребности установки пиролиза водяного пара достигает 1,8 т на 1 т фолизируемого мазута. Вместе с тем в процессе пиролиза выделяется значительное количество высокопотенциальной теплоты с коксом и дымовыми газами

регенератора, температура которых достигает 1000–1140°С. При комбинировании с энергетической установкой это тепло можно использовать для выработки необходимого количества технологического пара. Если учесть также возможность использования тепла технологических газов (отводимой паро–газовой смеси и водяного пара), то общее количество утилизируемого тепла технологической части может превышать % теплоты сгорания расходуемого топлива. В схеме энерготехнологического паротурбинного блока с турбиной очищенные от сернистых соединений газ пиролиза и «водяной» газ, а также твердые частицы кокса, содержащиеся в дымовых газах регенератора, сжигаются в топке парогенератора энергоблока. Пар на технологические потребности отводится из отборов турбины. Теплота технологических газов используется для подогрева питательной воды.

5.6. Способы наилучшего функционально–структурного использования оборудования в химико–технологических системах

Разработку приемов, операций и средств, реализующих рассмотренные ранее способы ресурсосбережения для ХТП наилучшего использования ДС химико–технологических процессов, наиболее полной переработки сырья и рационального использования ТЭР, необходимо осуществлять с позиций системного подхода с учетом особенностей функционально–структурных взаимосвязей между отдельными ХТП, совокупность которых образует ресурсосберегающую ХТС. Способ наилучшего функционально–структурного использования оборудования ХТС включает следующие основные приемы и операции, часть из которых также используется для реализации других способов ресурсосбережения – наилучшего использования движущей силы ХТП, наиболее полной переработки сырья и др.

Приведем основные режимно–параметрические и аппаратно–конструкционные приемы наилучшего использования оборудования в ХТС, обеспечивающие интенсификацию ХТП и энергоресурсоэффективность ХТС:

- уменьшение сопротивлений массо– и теплопереносу, которые лимитируют процессы химического превращения;
- уменьшение гидравлического сопротивления аппаратов и машин;
- снижение кинетических сопротивлений для химических превращений; комбинирование однотипных аппаратов и узлов;
- агрегатирование функций аппаратов и узлов;
- создание оптимального инженерно–аппаратурного оформления ХТП и др.

К важнейшим технологическим приемам относятся:

- создание оптимальных технологических связей между оборудованием (байпасные и обратные технологические потоки);
- исключение нерациональных промежуточных технологических стадий, или операций, производства;
- дискретно периодическая подача вещества в аппарат и др.

Приведем основные организационно–технические приемы наилучшего функционально–структурного использования оборудования в ХТС:

- выбор режима функционирования ХТП (непрерывный, периодический, периодически–непрерывный или полунепрерывный режим);
- создание совмещенных гибких ХТС для выпуска многоассортиментной продукции с периодическими и полунепрерывными ХТП;
- разработка распределенных иерархических АСУТП;
- создание комбинированных ХТС;
- комплексная переработка сырья и ТЭР;
- утилизация вторичных материалов и вторичных энергоресурсов и др.

Очевидно, что среди указанных приемов наилучшего функционально–структурного использования оборудования, многие приемы, например:

- создание байпасных и обратных технологических потоков,
- комплексная переработка сырья и ТЭР,
- комбинированные ХТС,
- совмещение ХТП,
- утилизация вторичных материалов и ВЭР,

- создание иерархических АСУТП, обеспечивают как наилучшее использование ТЭР, так и наиболее полную переработку сырья, то есть комплексно снижают материалоемкость продукции ХТС.

Заключение.

Профессиональная карьера выпускников кафедры Логистики и Экономической Информатики (ЛогЭКИ) РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Кафедра Логистики и Экономической Информатики (ЛогЭКИ) создана в сентябре 2001 г. при поддержке программы “TEMPUS” Евросоюза.

На основе кафедры ЛогЭКИ в октябре 2006 г. в РХТУ был на правах факультета создан «Международный Институт Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики» (МИ–ЛРТИ), который в июле 2012 г. преобразован в Научно–образовательный Центр «МИ–ЛРТИ».

В составе кафедры ЛогЭКИ работают: 5 профессоров, 3 доцента, 1 ст. преподаватель и 2 ассистента.

Кафедра ЛогЭКИ обучает бакалавров технологии и магистров технологии по профилю «Энергоресурсосберегающие химические производства» (направление 18.03.02).

Выпускники кафедры ЛогЭКИ, бакалавры и магистры, получая один диплом имеют фактически три квалификации — «технолога», «логиста» и «управленца–организатора», поэтому они могут успешно решать следующие сложные важные задачи повышения экономической эффективности и конкурентоспособности производств, предприятий и цепей поставок химического и нефтегазохимического комплекса (НГХК):

- **инжиниринг оптимальных технологических схем и автоматизированных систем управления эксплуатацией энергоресурсосберегающих производств и цепей поставок; управление проектами по инжинирингу энергоресурсосберегающих экологически безопасных производств и цепей поставок НГХК;**

- анализ и управление производственными, финансовыми и экологическими решениями промышленных предприятий и цепей поставок, методы интенсификации химико–технологических процессов;
- составление планов стратегического, тактического и оперативного управления энергоресурсосбережением на промышленных предприятиях и в цепях поставок НГХК; организация цифровизации производства НГХК;
- организация и проведение энергетического аудита на промышленных, коммерческих и коммунально–бытовых предприятиях;
- оптимизация энергоресурсоэффективности производств, предприятий и цепей НГХК и малотоннажной химии;
- выбор и практическое использование корпоративных информационных систем логистического управления технологическими процессами, бизнес–процессами и материальными ресурсами предприятий; инжиниринг логистических систем управления «зелеными» цепями поставок продукции НГХК.

Основные учебные дисциплины, преподаваемые кафедрой ЛогЭКИ при обучении бакалавриантов:

- Теоретические основы инжиниринга энергоресурсосберегающих химических технологий.
- Логистика ресурсоэнергосбережения. Инжиниринг энергоресурсосберегающих химических производств, предприятий и цепей поставок.
- Корпоративные информационные системы логистического управления ресурсами предприятий и цепей поставок НГХК.
- Цифровизация производств и предприятий НГХК.
- Логистика промышленных производств и предприятий.
- Инновационный менеджмент. Информационный менеджмент.
- Энергетическая эффективность и энергетическая безопасность предприятий и цепей поставок. Надежность и управление рисками производств НГХК.

- Инжиниринг оптимальных ресурсоэнергосберегающих химико–технологических процессов (ХТП) и химико–технологических систем (ХТС).
- Бизнес–планирование проектов и программ по энергоресурсосбережению.
- Управление запасами и эколого–экономическая оптимизация энергоресурсоэффективных производств и цепей поставок. Инжиниринг логистических систем управления «зелеными» цепями поставок НГХК.
- Программно–информационное обеспечение автоматизированных систем интегрированной логистической поддержки (автоматизированных систем СALS–технологий) импортозамещающей наукоемкой продукции на всех этапах её жизненного цикла.

До 2010 г. кафедра ЛогЭКИ успешно выполняла три МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТА по программе “TEMPUS” на тему: «Разработка учебных программ для обучения магистрантов и аспирантов в области ресурсосберегающих химико–технологических систем и логистики нефтегазохимического комплекса».

В период обучения на кафедре ЛогЭКИ возможны зарубежные стажировки студентов в Университетах Евросоюза (Генуя, Барселона, Манчестер).

Все выпускники кафедры ЛогЭКИ после успешного обучения получают уникальную «широкую технологически–управленческую квалификацию», которая позволяет им успешно работать в различных отраслях и сферах деятельности экономики России и индустриально развитых государств:

- в области инжиниринга, организационно–технической деятельности: на производственных предприятиях, в инжиниринговых центрах и консультативных центрах, в проектных организациях и научно–исследовательских институтах, в вертикально–интегрированных компаниях нефтегазохимического, топливно–энергетического и химического комплекса;

- в области логистики и управления цепями поставок, организационно-экономической и административно-управленческой деятельности в сфере: производства; материально-технического обеспечения; электронного предпринимательства; складирования; транспорта; коммерции; оказания услуг; государственного и муниципального управления.

МЕСТА РАБОТЫ ВЫПУСКНИКОВ КАФЕДРЫ ЛОГЭКИ:

- ОАО «Газэкономика»;
- ОАО «МосНПЗ»;
- ОАО «Автофрамос» (Группа компаний «Renault»);
- ОАО «Лукойл»;
- ОАО «Газпром-Нефть»;
- ООО "Самсунг Электроникс Рус» ("Samsung Electronics");
- Транспортная дирекция Олимпийских игр;
- ООО «МосСтройТрансГаз»;
- ООО "Мерц Фарма» (Merz Pharma Group);
- ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО»;
- ООО «Исток-Аудио Трейдинг»;
- ООО Концерн «ГазРезерв».

ПАРТНЕРЫ кафедры ЛогЭки и МИ-ЛРТИ (НОЦ)

Федеральный Исследовательский Центр Биотехнологии РАН;

Научно-Исследовательский Центр «Курчатовский институт»;

ВИАМ

ИНСТИТУТЫ РАН:

- институт проблем управления им. Трапезникова РАН,
- Институт общей и неорганической химии им Н.С. Курнакова РАН,
- Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
- Институт проблем химической физики РАН,
- Институт экономики РАН,

- Институт мировой экономики и международных отношений РАН,
- Институт проблем рынка РАН,
- ВНИИ Фитопатологии.

УНИВЕРСИТЕТЫ:

- Казанский ГТУ (НИУ),
- МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ),
- Высшая Школа Экономики (НИУ),
- Саратовский ГТУ, МЭИ (НИУ),
- УГНТУ,
- Башкирский Государственный университет,
- Тульский Государственный университет,
- Уфимский Государственный нефтяной технический университет.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПАНИИ И КОРПОРАЦИИ:

- ОАО «ГАЗПРОМ–НЕФТЬ»,
- ОАО «ТАТТРАНСГАЗ»,
- ОАО «Щекино–Азот»,
- ГУП «БашНефтеМаш»,
- ОАО «Салаватнефтеоргсинтез» и «Новоуфимский НПЗ»,
- ОАО «ГазЭкономика»,
- ГК «РосЭлектроника»,
- ОАО «МосНПЗ».

МЕЖДУНАРОДНЫЕ КОНТАКТЫ КАФЕДРЫ ЛогЭКИ и МИ–ЛРТИ (НОЦ)

- Генуэзский Университет и Римский Университет (Италия),
- Технический Университет (г. Веспрем, Венгрия),
- Университет Манчестера (Великобритания),
- Империял Колледж (Лондон, Великобритания),
- Каталонский Политехнический Университет (Барселона, Испания).

Кафедра ЛогЭКИ является ассоциативным членом в программе SAP «Университетский альянс» (Договор между SAP SE, Германия, и РХТУ им. Д.И. Менделеева).

Глоссарий основных терминов и понятий

Алгоритм – набор набор процедур и инструкций, описывающих порядок действия для достижения требуемых результатов, в том числе результатов по управлению обращением или оценки воздействия на окружающую среду опасных химических веществ.

Анализ ресурсоемкости объекта – анализ структурных, абсолютных, относительных и удельных показателей, характеризующих расход ресурсов на стадиях жизненного цикла объекта с целью выявления факторов экономии ресурсов.

Анализ ХТС – инженерно–техническая операция исследования ХТС, расчет характеристик и показателей качества функционирования ХТС, определение влияния параметров ХТС на ее характеристики и режимы эксплуатации.

Декомпозиция – представление системы в виде совокупности подсистем, состоящих из более простых элементов.

Задача (в области инжиниринга) – требуемое, рекомендуемое или допустимое действие, призванное внести вклад в достижение одного или нескольких результатов процесса или деятельности.

Зелёная химия – направление научной деятельности объединяющее в себя открытие, синтез, производство и применение химических процессов и продукции, обеспечивающих уменьшение или исключение вредного воздействия химических веществ или технологий на окружающую среду и здоровье человека, а также рациональное использование природных ресурсов, на различных этапах их жизненного цикла.

Инженер – специалист, профессионально занимающийся инженерным делом.

Инженерное дело – профессиональная деятельность, связанная с применением систематического, строгого, количественного подхода для создания и применения информации о физических объектах, системах, процессах и их взаимодействии в целях создания новых сущностей.

Инжиниринг – инженерно–консультационная деятельность, содержанием которой является решение инженерных задач, связанных с созданием

или совершенствованием продукции, систем и процессов. Предметом инжиниринга является не продукция, не проектирование и не производство продукции, а интеллектуальный процесс решения творческих (инженерных) задач, связанных с проектированием и организацией процессов производства продукции.

Информация (в области инжиниринга) – документированные и логически организованные знания, данные и сведения, отображающие явления и законы природы, общества и мышления, получаемые и применяемые в области инжиниринга. В области инжиниринга важное значение имеет и представление информации, как меры уменьшения неопределенности в отношении свойств и состояния сущности, представляющей интерес для субъекта.

Качество – совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворить установленные и предполагаемые потребности.

Качество окружающей среды – степень соответствия антропогенных и/или техногенных условий деятельности потребностям развития техносферы с учетом обеспечения безопасности биосферы.

Качество природной среды – степень соответствия биоестественных природных условий для безопасной жизнедеятельности субъектов и объектов биосферы.

Качество функционирования ХТС – совокупность свойств, определяющих техническое состояние и степень пригодности данной системы к выполнению заданных целей функционирования.

Ключевые показатели производительности (Key performance indicator – KPI) – определенные на глобальном уровне показатели, рассчитываемые на основе первичных исходных данных о производственно–финансово–экономической деятельности предприятия, позволяющих оценивать фактическое состояние и изменение показателей эффективности всех бизнес–процессов экономической, социальной и экологической деятельности.

Конкурентоспособность продукции (как товара на рынке) – относительная (применительно к товарам аналогам – конкурентам) предположительная рыночная характеристика продукции, позиционируемой в

условиях целевого рынка и заданного периода времени, определяемая как привлекательность, выражаемая в потенциальной возможности товара удовлетворять требования конкретного покупателя по показателям качества, экологичности, безопасности, ресурсопотребления и затратам на приобретение данного товара (он нравится, нужен по опыту, совету и т.д.).

Конструкционные параметры ХТС – совокупность геометрических характеристик конструкций аппаратов образующих систему.

Коэффициент полезного использования энергии – отношение всей полезно используемой в хозяйстве энергии к суммарному количеству израсходованной энергии в пересчете ее на первичную.

Критерий эффективности – это некоторый показатель, оценивающий степень приспособленности ХТС к выполнению поставленных целей функционирования и уровень использования различных ресурсов при функционировании системы. Критерии эффективности необходимы для определения оптимальных параметров и технологических режимов ХТС, для сравнительной оценки альтернативных вариантов ХТС при решении задач реконструкции и проектирования объектов химической промышленности, для сравнительной оценки качества различных алгоритмов управления ХТС.

Малоотходная технология – технология, позволяющая сократить до технически возможного в настоящее время минимума получение твердых отходов, жидких сбросов, газообразных и тепловых выбросов при получении какой-либо продукции.

Математическое моделирование – метод изучения свойств некоторых реальных систем с применением вычислительных экспериментов с математическими моделями.

Математическая модель – совокупность математических соотношений, уравнений, неравенств и т.п., описывающих основные закономерности, присущие изучаемому процессу, объекту или системе.

Наилучшая доступная технология (НДТ) – технологический процесс, технический метод, основанный на современных достижениях науки и техники, направленный на снижение негативного воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду и имеющий уста-

новленный срок практического применения с учетом экономических, технических, экологических и социальных факторов.

Оптимизация – целенаправленная деятельность, обеспечивающая получение наилучших в определенном смысле результатов при соответствующих условиях и ограничениях.

Оценка воздействия на окружающую среду химических веществ (Environmental Impact Assessment of Chemicals) – определение характера и степени опасности всех потенциальных видов влияния на природную среду обращающихся на исследуемой территории химических веществ и оценка экологических, социальных и экономических последствий этого воздействия.

Параметры ХТС – физические и химические величины, которые характеризуют особенности протекания различных физико–химических явлений в каждом ХТП, условия проведения и особенности инженерно–аппаратного оформления каждого ХТП системы. Параметры ХТС подразделяют на конструкционные и технологические.

Подсистемы окружающей среды – рассматриваемые при анализе воздействия на окружающую среду как отдельные составляющие окружающей среды подсистемы – атмосфера (в которой в ряде случаев в качестве отдельного компонента может выделяться городской воздух), гидросфера (причем пресные и морские водоемы представляются и оцениваются отдельно), почва (как часть литосферы) и биота.

Показатель энергетической эффективности – абсолютная, удельная или относительная величина потребления или потерь энергетических ресурсов для продукции любого назначения или технологического процесса.

Показатель энергосбережения – качественная и/или количественная характеристика проектируемых или реализуемых мер по энергосбережению.

Производство – конечный результат деятельности, направленной на создание материальных объектов, предназначенных для применения в качестве средства удовлетворения потребностей или требований.

Рациональное использование ресурсов – достижение максимальной эффективности использования ресурсов в хозяйстве при существующих

щем уровне развития техники и технологии с одновременным снижением негативного воздействия на окружающую среду.

Ресурсоёмкость продукции – показатели материалоемкости и энергоёмкости при изготовлении, ремонте и утилизации продукции. Ресурсоёмкость определяет показатели ресурсопотребления и ресурсосбережения, включающие конструктивно–технологические свойства продукции (в том числе показатели, обуславливающие фактическое потребление материальных и энергетических ресурсов на стадии изготовления продукции).

Ресурсосберегающая технология – технология, при которой потребление всех типов ресурсов сведено к рациональному (минимальному) уровню.

Ресурсосбережение – организационная, экономическая, техническая, научная, практическая и информационная деятельность, методы, процессы, комплекс организационно–технических мер и мероприятий, сопровождающих все стадии жизненного цикла объектов и направленных на рациональное использование и экономное расходование ресурсов.

Ресурсы – используемые и потенциальные источники удовлетворения потребностей общества. Укрупненно можно подразделить все ресурсы на материальные и энергетические (первичные и вторичные), интеллектуальные, трудовые, информационные, финансовые, временные, традиционные и нетрадиционные. К ресурсам относят: работников, инфраструктуру, производственную среду, информацию, поставщиков и партнеров, природные и финансовые ресурсы; материальные ресурсы, такие как усовершенствованные производственные и вспомогательные средства; нематериальные ресурсы, такие как интеллектуальная собственность; ресурсы и механизмы, содействующие инновационным постоянным улучшениям.

Синтез ХТС – инженерно–техническая операция создания принципов и способа функционирования ХТС, разработки структуры ХТС, определения параметров и характеристик, входящих в систему ХТП, которые обеспечивают требуемые цели функционирования ХТС.

Система качества – совокупность организационной структуры, ответственности, процедур, методик, процессов и ресурсов, необходимых для общего руководства качеством.

Система управления отходами – развернутый комплекс мероприятий и действий по сбору, транспортировке, переработке, вторичному использованию или утилизации отходов и контролю всего процесса.

Системность – свойство объекта обладать всеми признаками системы.

Системный анализ – совокупность методов и средств исследования и разработки сложных и сверхсложных объектов, в том числе, и методами принятия обоснованных решений при проектировании, создании и управлении техническими, технологическими, экономическими и социальными системами.

Системный подход – методологическое направление в области разработки общей стратегии и методологии, а также неформализованных, или эвристических, и формализованных методов комплексного исследования процессов, явлений и объектов как сложных систем разных типов и классов. Системный подход предполагает, что взаимосвязь и взаимодействие элементов, процессов и явлений, происходящих в некоторой системе (объекте), обеспечивает появление у этой системы (объекта) принципиально новых свойств, которые не присущи ее отдельным элементам, подсистемам, процессам и явлениям. Системный подход основан на одном из важнейших законов диалектического материализма – законе всеобщей взаимосвязи, взаимодействия и взаимообусловленности явлений и объектов в окружающей среде.

Системный подход в химической технологии – методологическое направление, основная цель которого состоит в разработке общей стратегии, а также неформализованных, или эвристических, и формализованных, или вычислительных методов комплексного исследования и создания разных типов и классов сложных ХТП и ХТС. Системный подход предполагает, что взаимосвязь и взаимодействие ХТП, входящих в некоторую ХТС обеспечивают появление у этой ХТС принципиально новых свойств, которые не присущи её отдельным ХТП.

Теория анализа и синтеза ХТС – представляет собой научную дисциплину по разработке и применению методов и инструментов решения важнейших задач ускорения научно–технического прогресса в химических отраслях промышленности: реконструкции действующих производств для повышения их эффективности; оптимизации технологических режимов производств с целью экономии расходов сырья и ТЭР на предприятиях; проектирования оптимальных энергоресурсоэффективных экологически безопасных производств.

Технологическая структура, или технологическая топология ХТС – строение и внутренняя форма организации системы, отражающая состав элементов и особенности взаимосвязей между ними. Технологическую структуру (технологическую топологию) ХТС формально можно охарактеризовать числом элементов определённого конструкционного типа, в которых протекают химико–энерготехнологические процессы, а также известным законом взаимосвязей между отдельными элементами и числом технологических потоков в системе.

Техносфера – часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (ресурсы, здания, дороги, механизмы, сооружения и др.), становящиеся частью ноосферы с целью удовлетворения социально–экономических потребностей.

Топливо–энергетические ресурсы (ТЭР) – совокупность природных и произведенных энергоносителей, запасенная энергия которых при существующем уровне развития техники и технологии доступна для использования в хозяйственной деятельности.

Управление – процесс формирования целенаправленного поведения системы посредством информационных воздействий, вырабатываемых человеком или специальным управляющим устройством, регулятором.

Утилизация – виды работ по обеспечению ресурсосбережения, при которых осуществляются переработка и/или вторичное использование отслуживших установленный срок и/или отбракованных изделий, материалов, упаковки и т.п., а также отходов.

Химико–энерготехнологическая система (ХЭТС) – целенаправленная совокупность химико–энерготехнологических процессов, аппаратов и машин химической технологии, которая обеспечивает проведение

требуемых энергоёмких технологических операций химической и физической переработки сырья в продукты потребления и в промежуточные продукты. В структуру ХЭТС входят наряду с высокоэффективными аппаратами и машинами химической технологии разнообразные специальное теплотехническое и энергетическое оборудование.

Химико–энерготехнологический процесс (ХЭТП) – совокупность физико–химических явлений, осуществляющая химические и физические преобразования веществ с выделением и поглощением большого количества энергии, тесно взаимодействующих с определёнными теплотехническими и теплоэнергетическими явлениями, что обеспечивает требуемый выпуск высококачественной химической продукции с желаемыми технологическими показателями.

Энергетическая эффективность (энергоэффективность) – характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования топливно–энергетических ресурсов к затратам топливно–энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю.

Энергия – продукция, являющаяся средством труда для выполнения работы, оказания услуги или предметом труда для выработки энергии другого вида.

Энергоемкость – это количество энергии, необходимое для получения единицы какого–либо продукта или определенного результата, например, услуги.

Энергоноситель – вещество в различных агрегатных состояниях, запасенная энергия которого может быть использована для целей энергообеспечения.

Энергосберегающая технология – новый или усовершенствованный технологический процесс, характеризующийся более высоким коэффициентом полезного использования топливно–энергетических ресурсов.

Энергосбережение – реализация организационных, правовых, технических, технологических и экономических мер, направленных на

уменьшение объема используемых топливно–энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования, в том числе объема произведенной продукции, выполненных работ, оказанных услуг.

Эффективное использование энергетических ресурсов – достижение экономически оправданной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологии и соблюдении требований к охране окружающей среды.

Эффективность объекта – результативность создания и использования объекта как отношение суммарного полезного эффекта к совокупным затратам за его жизненный цикл.

Эффективность управленческого решения – степень достижения запланированного результата на единицу затрат путем реализации решения.

Литература

1. Мешалкин В. П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств: основы теории и наилучшие практические результаты. – М.; Генуя: Химия, 2010. – 393 с.
2. Meshalkin V.P. Energy-saving technology performance and efficiency indexes //Chem. Eng. Transactions. – 2009. – Т. 18. – С. 953–958.
3. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. Основы энергоресурсоэффективных экологически безопасных технологий нефтепереработки. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – 616 с.
4. ГОСТ Р 57306–2016. Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга.
5. ГОСТ Р 52104–2003. Ресурсосбережение. Термины и определения.
6. ГОСТ Р 53905–2010. Энергосбережение. Термины и определения.
7. ГОСТ Р ИСО 50001–2012. Системы энергетического менеджмента.
8. ГОСТ Р 56222–2014. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения в области материалов.
9. ГОСТ Р ИСО 14001–2016. Системы экологического менеджмента. Требования и руководство к применению.
10. [Best Available Techniques REferences «BAT-BREF»²⁴](#).
11. Боравский Б.В., Скобелев Д.О., Венчикова В.Р., Боравская Т.В. Наилучшие доступные технологии. Аспекты практического применения. – М.: «Перо», 2014. – 184 с.
12. Мешалкин В.П. Логистика и электронная экономика в условиях перехода к устойчивому развитию. – М.: АНО «Изд-во физ.-мат. лит.», 2004. – 408 с.
13. [Л. Осика. Современный инжиниринг: определение и предметная область](#) // ЭнергоРынок. – апрель 2010. – № 04 (76)²⁵.

24 <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

25 <http://www.e-m.ru/er/2010-04/29516/>

14. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии. – М.: Химия, 1993. – 368 с.:ил.
15. Мешалкин В.П., Мошев Е.Р. Комплекс программ поддержки жизненного цикла трубопроводных систем нефтехимических предприятий // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 4 (64) С. 57–75/
16. Методология структурного анализа и проектирования: [Пер. с англ.] / Дэвид А. Марка, Клемент Л. МакГоуэн; Предисл. Д. Т. Росса. – М.: Фирма "Мета Технология", 1993. – 240 с.
17. Руководящий документ РД IDEF 0 – 2000. Методология функционального моделирования IDEF0. – М.: Госстандарт России.
18. Ицкович Э.Л. Развитие АСУ технологического производства в рамках концепции Индустрия 4.0 (Industry 4.0), «Датчики системы», №7 (2016) июль 2017/с. 52–63
19. [Справочник химика 21. Химия и химическая технология](#)²⁶.
20. Белоглазов Н.Н., Муравьев А.И. Интенсификация и повышение эффективности химико–технологических процессов, «Химия», 1988. – 206 с. :ил.
21. Кардашов Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии, – М.: «Химия», 1990, – 208с. :ил
22. Кафаров В. В., Мешалкин В. П. Ресурсосберегающие химические производства // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Процессы и аппараты хим. технологии. – Т. 15. – 1987. – С. 85–158.
23. Jacob A. Moulijna, Andrzej Stankiewicz, Johan Grievinka, Andrzej G´orak. Process intensification and process systems engineering: A friendly symbiosis
24. Edited by Frerich Johannes Keil. Process intensification / <https://www.degruyter.com/view/j/revce.2018.34.issue-2/revce-2017-0085/revce-2017-0085.xml>
25. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико–технологических систем: – М.: Химия, 1991. – 432 с.

26 <https://www.chem21.info>

26. European roadmap of process intensification / Creatieve Energie / https://traxxys.com/wp-content/uploads/2017/05/2.2.8.1_Technology_Report_Reactive_Distillation_Schoenmakers.pdf
27. R. Smith Chemical Process Design and Integration, 2nd. Ed, “WILEY”, 435 p.
28. J.J. Klemes, P.S. Varbanov etc., Sustainable Process Integration and Intensification, 2nd ed., DEGRUYTER, 789p.
29. Andrzej I. Stankiewicz, Jacob A. Moulijn Process Intensification: Transforming Chemical Engineering // Chemical Engineering Progress. – 2000. – pp. 22–34.
30. Бузник В.М. Химия. Устойчивое развитие. Высокотехнологичный бизнес. – Владивосток: «Дальнаука», 2002 – 200 с., –ил.

Краткие сведения об авторе



Мешалкин Валерий Павлович

Академик РАН, профессор, доктор технических наук.

Директор Международного Института Логистики Ресурсосбережения и Технологической Инноватики (НОЦ) Российского химико–технологического университета имени Д.И. Менделеева, зав. кафедрой Логистики и Экономической Информатики РХТУ имени Д.И.Менделеева, гл. научный сотрудник Института Общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова РАН.

ПРАВИТЕЛЬСТВЕННЫЕ НАГРАДЫ

- Заслуженный деятель науки РФ,
- Заслуженный работник высшей школы РФ,
- Лауреат Премии Президента РФ в области образования,
- Лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники,
- Лауреат конкурса «Золотые имена высшей школы России–2018».

КРАТКАЯ НАУЧНО–ОРГАНИЗАЦИОННАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Автор более 1000 научных трудов, в том числе 87 книг, 30 патентов и авторских свидетельств, 25 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Индекс Хирша – 28 (РИНЦ).

Количество цитирований статей в журналах по данным Web of Science – 221, 1Scopus – 184; РИНЦ – 2402. Зарегистрирован в системе Science Index.

- Член бюро Отделения Химии и Наук о Материалах РАН.
- Председатель диссертационного совета Д212.204.16 при РХТУ им. Д.И. Менделеева.
- Заместитель главного редактора журнала РАН «Теоретические основы химической технологии».
- Член редакционных коллегий журналов:
 - «Химическая промышленность»,
 - «Логистика»,
 - «Прикладная информатика»,
 - «Датчики и системы»,
 - «Известия вузов: химия и химическая технология»,
 - «Известия вузов: черная металлургия»,
 - «Нефтегазохимия»,
 - «Журнал прикладной химии»,
 - «Hemijska Industrija» (Сербия).

Подготовил 14 докторов наук и 101 кандидата наук.

ОБЛАСТЬ НАУЧНЫХ ИНТЕРЕСОВ

Известный ученый в области химической технологии – основатель нового научного направления: «Теоретические основы инжиниринга, обеспечения надежности и логистического управления энергоресурсоэффективностью химико–технологических систем (ХТС) производства высококачественной продукции».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщены и развиты:

- способы обеспечения энергоресурсосбережения в ХТС;
- методология интенсификации ХТС.

Предложены:

- эвристическо–вычислительные и термодинамические методы синтеза структуры оптимальных энергоресурсоэффективных производственных ХТС, экологически безопасных ХТС переработки твердых отходов и энергоэффективных ХТС комплексной водоочистки;

- топологические методы анализа и оптимизации надежности ХТС.

Разработаны методологии инжиниринга цифровизированных ХТС:

- мониторинга и оценки воздействия предприятий на окружающую среду, управления рисками и эколого–экономической оптимизации ХТС;
- компьютеризированной логистической поддержки жизненного цикла ХТС; составления сводных топливно–энергетических балансов региональных промышленных комплексов.

Предложены:

- фрактально–вейвлетные методы анализа нестационарных газовых потоков в сложных трубопроводах;
- быстродействующие методы компьютерного анализа термогидродинамики подводных газопроводов;
- методология оптимизации структуры и режимов логистического управления цепями поставок в нефтегазохимическом и металлургическом комплексе;
- фрактально–вейвлетные и нечетко–нейронно–сетевые методы анализа текстуры нанокompозитов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ:

1. Мешалкин В.П. Экспертные системы в химической технологии: Основы теории, опыт разработки и применения. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
2. Мешалкин В.П., Кантюков Р.А., Бутусов О.Б. Математические методы и информационные системы анализа воздействия на природную среду нефтегазового комплекса. – СПб.: Недра, 2014. – 366 с.
3. Мешалкин В.П., Кантюков Р.А., Ахметова В.Н. Стратегическое управление инновационной деятельностью в региональных промышленных комплексах: основы методологии и практические результаты. – СПб.: Недра, 2014. – 488 с.
4. Мешалкин В.П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств. – М. ; Генуя : Химия, 2010. – 393 с.

5. Мешалкин В.П., Дли М.И. Логистика и управление конкурентоспособностью предприятий нефтехимического комплекса. – М. ; Генуя : Химия, 2010. – 452 с.
6. Кравченко К.А., Мешалкин В.П. Организационное проектирование и управление развитием крупных компаний. – М. : Академический Проект ; М. : Альма Матер, 2006. – 527 с.
7. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико–технологических систем. – Харьков : НГУ "ХПИ", 2006. – 410 с.
8. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико–технологических систем : – М.: Химия, 1991. – 432 с.